

# Table des matières

Résumé court .....	i
Résumé long .....	ii
Abstract.....	iv
Remerciements.....	v
Avant-Propos .....	vii
Introduction.....	1
Chapitre I .....	3
Revue de littérature .....	3
1.1 Généralités .....	3
1.2 La conception du bois d'ingénierie.....	4
1.3 Définition d'aboutage.....	5
1.4 Facteurs qui affectent la qualité d'aboutage .....	6
1.4.1 Géométrie de joints .....	6
1.4.2 Types de configurations de joints .....	9
1.4.3 Orientation des entures .....	11
1.4.4 Conditions du bois .....	13
1.4.5 Le collage.....	16
1.5 L'usinage du bois abouté. ....	21
1.6 Évaluation microscopique des surfaces du bois obtenues par divers procédés d'usinage .	25
1.7 Techniques utilisées pour l'évaluation de la performance du bois abouté .....	26
1.8 Caractéristiques mécaniques d'une poutrelle en I et normes exigées lors du jointage .....	27
1.9 Exigences de performance lors des essais mécaniques sur bois massif et sur bois abouté d'épinette noire.....	30
Chapitre II .....	35
Effet de la teneur en humidité d'équilibre et de la température du bois sur la résistance à la traction du bois d'épinette noire abouté par entures multiples.....	35

2.1 Résumé.....	35
2.2 Abstract.....	36
2.3 Revue de littérature.....	36
2.4 Matériel et méthodes .....	38
2.5 Résultats et discussion.....	41
2.6 Conclusions .....	45
2.7 Références citées .....	45
 Chapitre III.....	49
Structural performance of finger-joined black spruce lumber with different joint configurations .....	49
3.1 Résumé.....	50
3.2 Abstract.....	50
3.3 Materials and methods .....	53
3.4 Results and discussion.....	57
3.5 Conclusion .....	62
3.6 Literature cited.....	62
 Chapitre IV .....	66
Effects of curing time and end-pressure on the tensile strength of finger-joined black spruce lumber .....	66
4.1 Résumé.....	67
4.2 Abstract.....	67
4.3 Material and methods .....	70
4.4 Results and discussion.....	72
4.5 Conclusion .....	77
4.6 Literature cited.....	77
 Chapitre V.....	81
Influence of machining parameters on the structural performance of finger-joined black spruce .....	81

5.1 Résumé.....	82
5.2 Abstract.....	82
5.3 Introduction and background .....	83
5.4 Materials and methods .....	85
5.5 Results and discussion.....	87
5.5.1 Effects of wood machining parameters .....	87
5.5.2 SEM analysis of transverse glueline faces.....	90
5.6 Conclusion .....	95
5.7 Literature cited.....	95
 CONCLUSION GÉNÉRALE.....	99
 Bibliographie .....	104
 ANNEXE A .....	118
Résumé du sondage réalisé aux entreprises d'aboutage du bois .....	118
 ANNEXE B .....	127
Effet de la pression sur la surface collée des joints. Une analyse microscopique .....	127

# Liste des tableaux

## CHAPITRE I

Tableau 1. 1. Facteurs qui affectent la résistance mécanique des bois aboutés (d'après Fröblom 1975). ....	7
Tableau 1. 2. Propriétés mécaniques de l'épinette noire provenant des Etats-Unis, testé à l'air et ajusté à une humidité de 12 pourcent (d'après Bodig et Jayne 1982) ....	31
Tableau 1. 3. Propriétés mécaniques de l'épinette noire croissant au Canada, testé à l'air et ajusté à une humidité de 12 pourcent (d'après Jessome 2000). ....	31
Tableau 1. 4. Valeurs de contrainte à la rupture en traction longitudinale (UTS) pour le groupe de bois sapin-épinette-pin. (d'après Barrett et Lau 1994). ....	31
Tableau 1. 5. Exigences pour les test de flexion et de traction selon la norme SPS-1 (National Lumber Grades Authority 2000b).....	32

## CHAPITRE II

Tableau 2.1. Valeur moyenne de la contrainte à la rupture en traction (MPa) du bois d'épinette noire abouté à quatre températures et trois teneurs en humidité du bois <sup>a</sup> .....	42
---	----

## CHAPITRE III

Table 3. 1. MOR determined from edge- and flat-wise bending tests for three profiles of finger-joints of black spruce. ....	58
Table 3. 2. Ultimate tensile strength (UTS) for the three profiles of finger-joints of black spruce. ....	60

## CHAPITRE IV

Table 4. 1. Ultimate tensile strength (UTS) of finger-joined black spruce wood as determined from tension tests with different curing times. ....	73
---	----

Table 4. 2. Ultimate tensile strength (UTS) of finger-joined black spruce wood as determined from tension tests with different end-pressure levels. ....	76
--	----

## CHAPITRE V

Table 5. 1. Ultimate tensile strength (MPa) of finger-joined black spruce machined at three different cutting speeds and three chip-loads <sup>a</sup> . ....	88
Table 5. 2. Depth of damage measured from SEM images and corresponding ultimate tensile strength (UTS) of finger-joined black spruce machined at three cutting speeds.....	93
Table 5. 3. Feed speeds (m/min) required to produce the three cutting speeds and three chip-loads studied in this experiments.....	95

## ANNEXE A

Tableau A. 1. Sondage sur la matière première.....	119
Tableau A. 2. Contrôle de la qualité de la matière première. ....	120
Tableau A. 3. Antécédents généraux du procédé d'aboutage. ....	122
Tableau A. 4. Application de l'adhésif.....	123
Tableau A. 5. Assemblage et pressage des joints. ....	124
Tableau A. 6 . Essais de contrôle de la qualité des joints. ....	125
Tableau A. 7. Autres aspects reliés au procédé d'aboutage du bois.....	126

## ANNEXE B

Tableau B. 1. Effet de la pression d'assemblage sur le jeu du fond des entures du bois abouté d'épinette noire. ....	132
--	-----

# Liste des figures

## CHAPITRE I

Figure 1. 1. Nomenclature et géométrie d'aboutage (d'après le Centre Technique du Bois 1973) .....	8
Figure 1. 2. Effet de l'épaisseur de l'extrémité d'entures sur la résistance mécanique en traction longitudinale du bois abouté par entures multiples de sapin douglas (adapté de Selbo 1963).....	10
Figure 1. 3. Effet du type de joint sur la résistance mécanique à la traction par rapport à celle du bois massif (d'après Selbo 1975).....	11
Figure 1. 4. Types de configuration des joints A: Sans épaulement, B: Mâle-femelle, C: Inversée.....	12
Figure 1. 5. Terminologie principale du porte-outil (d'après ACEco 2000).....	22
Figure 1. 6. Schéma d'une semelle soumise à une contrainte de compression en haut et à une contrainte de traction en bas.....	29
Figure 1. 7. Distribution des contraintes et des déformations dues au moment de flexion en comportement élastique d'une poutre à âme mince symétrique, où les semelles sont affectées par la compression en haut et par la traction en bas. (adapté de Samson 1980, Leitchi <i>et al.</i> 1990 et Ménard 2000).....	29
Figure 1. 8. Décomposition des efforts sur la surface de collage d'une enture. (adapté de Bergeron <i>et al.</i> 1979, Sandoz 1984 et Ménard 2000). .....	29
Figure 1. 9. Différents modes de bris du bois abouté. (D'après ASTM D-4688 et SPS4-2001). .....	34

## CHAPITRE II

Figure 2. 1. Influence de la température avant usinage et collage sur la contrainte à la rupture en traction longitudinale du bois d'épinette noire abouté à trois conditions de teneurs en humidité.....	43
---	----

Figure 2. 2. Influence de la teneur en humidité avant usinage et collage sur la contrainte à la rupture en traction longitudinale du bois d'épinette noire abouté à quatre conditions de température.....	44
---	----

### CHAPITRE III

Figure 3. 1. a) Side view of the types of structural joints used in Eastern Canadian mills: (A) feather, (B) male-female, and (C) reverse.....	54
Figure 3. 2. Dimension of the joint for three profiles of finger-joints used in this study.....	56
Figure 3. 3. Comparison among MOR values as determined from edge- and flat-wise bending tests for the three profiles of finger-joints of black spruce. a) Minimum MOR, b) Mean MOR.....	58
Figure 3. 4. Comparison among minimum UTS values for the three profiles of finger-joints of black spruce and those specified in SPS-1 2000 (National Lumber Grades Authority 2000 b).....	60

### CHAPITRE IV

Figure 4. 1. Effect of curing time on the ultimate tensile strength (UTS) of finger-joined black spruce wood assembled at 3.75 MPa (544 psi) of end-pressure.....	74
Figure 4. 2. Effect of end pressure on the ultimate tensile strength (UTS) of finger-joined black spruce wood tested after 24 hours of curing time.....	76

### CHAPITRE V

Figure 5. 1. Influence of cutting speed and chip-load on the ultimate tensile strength (UTS) of finger-joined black spruce.....	88
Figure 5. 2. SEM micrographs of finger-joined black spruce transverse section, machined at a cutting speed of: A) 1676 m/min, B) 2932 m/min , and C) 3770 m/min, showing surface damage occurred during machining.....	91

**ANNEXE B**

Figure B. 1. Schéma de coupe des blocs pour l'analyse microscopique.....	128
Figure B. 2. Épaisseur de la couche des cellules endommagés en fonction de la pression d'assemblage du bois d'épinette noire abouté .....	129
Figure B. 3. Micrographies électroniques (SEM) de la profondeur de dommage de cellules du bois d'épinette noire abouté aux pressions de A) 1,3 MPa et B) 4,9 MPa.	130
Figure B. 4. Jeu du fond des entures du bois d'épinette noire, en fonction de la pression d'assemblage .....	132
Figure B. 5. Jeu du fond d'enture aux pressions de A) 1,3 MPa, B) 2,2 MPa, C) 2,8 MPa, D) 3,7 MPa, E) 4,0 MPa et F) 4,9 MPa.....	133

# Introduction

Les produits du bois à valeur ajoutée ont eu une croissance exceptionnelle dans les dernières années au Canada. Cela est principalement dû à l'innovation technologique qui a permis de développer une diversité de produits répondant aux exigences des principaux marchés. La création de nouveaux produits à valeur ajoutée permettra à l'industrie canadienne du bois de maintenir sa position dans les marchés internationaux et même de l'améliorer.

Les bois d'ingénierie occupent une part croissante du marché et ils sont vendus entre autres sous forme de poutres, de poutrelles de plancher et de plafond ou encore sous forme de bois abouté à haute performance. Ainsi, le marché du bois abouté est prometteur puisqu'on l'utilise de plus en plus pour les semelles des poutrelles et poutres en I. L'aboutage consiste à reconstituer des planches de bois en assemblant bout à bout des pièces courtes à l'aide d'un adhésif après avoir façonné une série d'entures dans les extrémités des pièces. La performance de ce joint est d'ailleurs fonction de plusieurs facteurs tels que la géométrie des entures, l'espèce, la vitesse d'avance et la vitesse rotationnelle des outils de coupe, l'état des outils de coupe, le type d'adhésif, le temps de durcissement de l'adhésif, la magnitude de la pression de collage et la période de temps sous cette pression. Une résistance mécanique adéquate est le principal critère exigé pour la performance du bois abouté. En conséquence, le procédé d'aboutage est un élément très important et qu'on doit surveiller lors de la fabrication des semelles de sorte à obtenir une bonne performance mécanique.

Le regroupement des espèces de bois reconnu sous le nom S-E-P au Canada (sapin, épinette et pin) est celui utilisée pour la fabrication des poutrelles. Ce groupe inclut l'épinette blanche, l'épinette d'Engelmann, l'épinette noire, l'épinette rouge, le pin Murray, le pin gris, le sapin concolore, et le sapin baumier. Au Québec, l'essentiel du bois utilisé dans le secteur de la poutrelle à semelle aboutée provient de l'épinette noire.

Ce projet de recherche s'inscrit dans le cadre d'un programme d'optimisation des

paramètres du procédé d'aboutage par entures multiples du bois d'épinette noire. L'objectif est de mieux comprendre les relations entre les conditions d'usinage et la qualité exprimée par la résistance mécanique du bois au niveau structural afin d'utiliser le mieux possible cette espèce et d'en tirer les meilleurs bénéfices. L'étude de l'influence des paramètres qui affectent la fabrication des pièces aboutées de qualité structurale du bois d'épinette noire devrait aider à la connaissance dans ce domaine.

La résistance mécanique du bois au niveau structural sera évaluée en fonction des paramètres d'usinage, de collage et des conditions du bois. Il sera nécessaire avant tout de définir les paramètres qui ont une plus grande influence sur le comportement mécanique du bois abouté.

# **Chapitre I**

## **Revue de littérature**

### **1.1 Généralités**

Le Québec a une superficie de 1 667 926 km<sup>2</sup>. La ressource forestière recouvre près de la moitié du territoire québécois, soit 764 897 km<sup>2</sup>. La forêt boréale, composée de conifères, représente 73,7% de ce territoire. Elle renferme presque exclusivement les espèces de sapin baumier, d'épinette noire, d'épinette blanche, du pin gris et du mélèze laricin (Parent 2002).

L'épinette noire est très répandue au Québec et au Canada, et s'étend sur la partie nord du continent nord-américain. L'arbre présente un diamètre se situant généralement entre 10 et 23 cm et il peut atteindre 12 à 20 m de hauteur (Viereck et Johnston 2002). La principale utilisation commerciale de l'épinette noire au Canada et aux États-Unis est orientée vers la fabrication de pâte à papier et de bois de colombages. Cependant, ce bois se prête particulièrement bien à la fabrication de semelles de poutrelles en I.

La fabrication de semelles jointées à partir de bois résineux s'inscrit parfaitement dans les tendances mondiales actuelles où l'on observe une forte croissance de la demande pour les produits du bois de haute qualité. La production du bois d'épinette noire jointé est une façon de s'adapter aux nouvelles réalités et de saisir les occasions d'affaires reliées à la transformation de produits à valeur ajoutée.

Le fait de favoriser une meilleure utilisation de la ressource forestière, l'amélioration des procédés de transformation, la fabrication de produits à valeur ajoutée du bois, la capacité de développer des produits de très bonne qualité à partir de sciages des résineux, sont autant d'aspects utiles pour le développement économique des régions forestières.

## 1.2 La conception du bois d'ingénierie

La conception du bois d'ingénierie vise à développer des produits à partir de bois collés tels que les poutres en bois lamellé-collé, les fermes de toit, les poutrelles en I, les poutres de placage laminées (Laminated Veneer Lumber, LVL), les poutres de lamelles parallèles (Parallam<sup>TM</sup>), les poutres de lamelles orientées (Timberstrand<sup>TM</sup>), les poutres ajourées et le bois abouté (Lamy 1995).

Le bois d'ingénierie a été conçu pour remplacer le bois massif traditionnellement utilisé dans l'industrie de la construction. Celui-ci vise à offrir des performances supérieures au bois naturel, dans le sens où il est en mesure de rencontrer des exigences plus élevées en terme de résistance mécanique et de rigidité et en terme également de portées (Lamy 1995). Ce produit utilise du bois de petites sections pour une meilleure résistance mécanique finale bien que sa fabrication nécessite plus d'ingénierie, de conception, de connaissances et de maîtrise technique. Le marché du bois d'ingénierie a connu une croissance très rapide au cours des dix dernières années et il continue de se développer. Par exemple, le rythme de croissance aux Etats-Unis d'Amérique est d'environ de 250 millions de pieds mesure de planche (pmp) par année et la tendance devrait se poursuivre (Forintek 2001).

De tous les produits d'ingénierie destinés à la construction de planchers, les poutrelles en I ont connu le plus grand succès. Les principaux avantages de ce produit sont sa légèreté et sa facilité de mise en œuvre (Forintek 2001).

Par ailleurs, au Canada la construction en bois prédomine largement. Au Québec, les entreprises dédiées à la fabrication de composantes de produits en bois d'ingénierie de structure travaillent principalement avec l'épinette noire (*Picea mariana* (Mill.) B.S.P.), qui possède une masse volumique et résistance mécanique adéquates. L'utilisation du bois

abouté dans les composantes structurales est très importante car celles-ci doivent résister à des sollicitations mécaniques élevées. Le bois abouté a déjà été utilisé avec succès dans les assemblages à angle pour les composantes de meubles (Richards 1962), dans la fabrication des systèmes de fermes de toit (Hoyle *et al.* 1973) et aussi dans la fabrication des poutres lamellées-collées (Wibbens 1989).

Au Québec, il y a une douzaine d'entreprises œuvrant dans le secteur du bois abouté et du lamellé-collé qui utilisent les espèces de sapin, épinette et pin. Les entreprises de ce secteur consomment annuellement près de 421 millions de pmp de bois (Belley 2002). Au Québec, le bois abouté à utilisation structurale est vendu le plus souvent comme composante des produits du bois d'ingénierie tels que la poutrelle en I. Cette dernière est formée de semelles en bois abouté en haut et en bas avec une âme en panneau de lames orientées (OSB) ou en contreplaqué. La performance mécanique est ainsi un élément important exigé. Il est alors nécessaire de surveiller tous les facteurs susceptibles d'affecter la performance mécanique du bois abouté.

### **1.3 Définition d'aboutage**

L'aboutage à entures multiples est un assemblage longitudinal réalisé par le collage de pièces de bois de fil et aux extrémités desquelles ont été pratiqués des coins trapézoïdaux semblables, appelés entures (Centre Technique du Bois 1973). L'utilisation de cette technique permet d'obtenir des pièces de bois de grande longueur ainsi que de récupérer des morceaux de bois de petite taille.

Les entures peuvent être usinées suivant la largeur (joint vertical) ou suivant l'épaisseur (joint horizontal). La surface est plus grande pour concevoir la forme des entures dans le joint vertical, bien qu'une tête de découpage plus large avec plus de couteaux soit requise (Forest Products Laboratory 1999). Le joint horizontal est plus commun en Amérique du Nord et sert surtout à la fabrication de bois abouté pour la construction (Forintek 2001).

## 1.4 Facteurs qui affectent la qualité d'aboutage

Les facteurs qui affectent la résistance mécanique des assemblages à entures très nombreux. Certains sont reliés au bois tels que l'espèce et la masse volumique alors que d'autres sont connexes aux procédés et incluent des facteurs tels que l'état des outils, le type d'adhésif, le temps de durcissement de l'adhésif ainsi que le niveau de pression d'assemblage et sa durée (Tableau 1.1). Plusieurs études ont ainsi été conduits sur ces facteurs (Selbo 1963, Strickler 1967, Centre technique du bois 1973, Fröblom 1975, Strickler 1980, Jokerst 1981, Morkved 1982). Jokerst (1981) entre autres discute des aspects tels que l'orientation des entures dans la pièce, la géométrie des joints, les adhésifs et l'effet de la pression de collage.

### 1.4.1 Géométrie de joints

La Figure 1.1 montre le profil des entures et leurs caractéristiques géométriques. Quatre variables sont importantes dans la géométrie des joints du bois abouté: la pente, le pas, la longueur et la largeur des extrémités des entures. Si l'on fixe trois des variables, la quatrième s'établit automatiquement et celle-ci détermine le dessin des joints. En conséquence, l'effet que possède une variable sur la résistance mécanique de l'union n'est pas indépendant des trois autres.

L'effet de la géométrie des joints a été étudié par divers auteurs (Richards et Goodrick 1959, Selbo 1963, Richards 1963, Selbo 1975a, Ayarkwa *et al.* 2000a). Richards et Goodrick (1959) ont évalué l'effet de la pente sur la résistance mécanique à la traction du bois de pin du sud. Quatre rapports de pente ont été utilisés pour l'étude, à savoir, 1:6, 1:9, 1:12, et 1:15. La pente de 1:15 a atteint une moyenne de 82% de la résistance mécanique à la traction du bois massif, alors que la pente de 1:6 n'a atteint que 54% de cette résistance. La pente faible assure un bon collage de bois dans le sens du fil, ce qui augmente la résistance mécanique. Par contre, la pente faible diminue le pas, ce qui augmente le nombre des extrémités des entures ( $\beta$ ) lesquelles provoquent de mauvais collages (Centre technique du bois 1973). Le comportement au collage de deux résineux (épinette de sitka et sapin douglas) et d'un feuillu plus dense (chêne blanc) a été étudié par Selbo (1963).

Tableau 1. 1. Facteurs qui affectent la résistance mécanique des bois aboutés (d'après Fröblom 1975).

Propriétés	Facteurs
Propriétés du bois	L'anatomie La masse volumique La proportion du bois final Les nœuds (la grandeur, la quantité et la forme) La pente du fil La grandeur des cernes annuels Le bois de tension ou de compression Le bois juvénile La teneur en humidité Les gerces produites par séchage La cambrure et le gauchissement La teneur en résine
Propriétés des joints	Le type de joint La géométrie et les dimensions des joints La direction de coupe des joints
Propriétés de production	Le séchage et le conditionnement La coupe transversale des blocs La coupe des entures Le type d'adhésif L'application des adhésifs La pression d'assemblage L'application de chaleur sur les joints L'entreposage Le rabotage Le contrôle de la qualité dans l'usine

Les effets de trois épaisseurs de l'extrémité de l'enture ( $\beta$ ), de six pentes et de six pas ont été évalués (Figure 1.1). Cet auteur soutient qu'une grande zone d'union collée et des entures bien minces sont requises afin de développer une résistance mécanique au cisaillement élevée. De plus, la résistance en traction longitudinale augmente avec la diminution de la pente des entures. Les entures doivent alors être assez longues et à faibles pentes afin de disposer d'une bonne surface de collage.

D'autre part, selon Morkved (1982) la longueur des entures aurait théoriquement peu

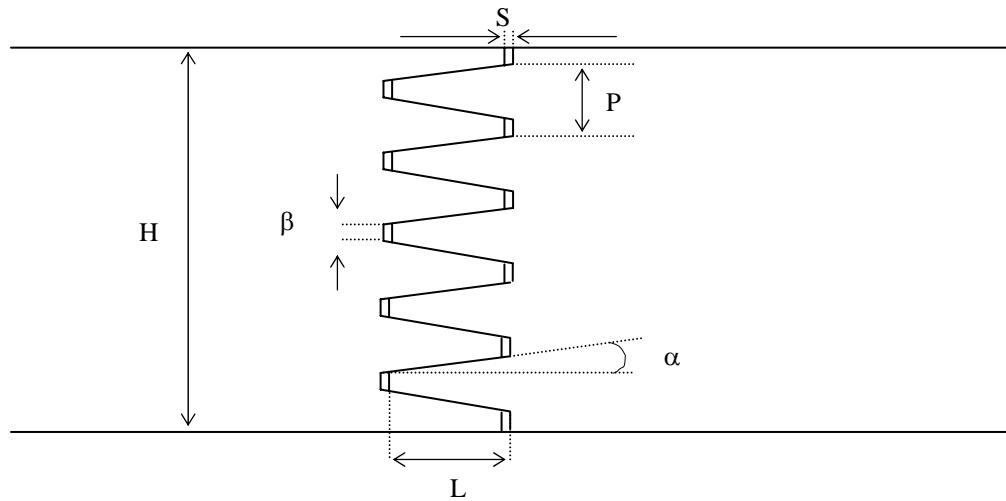


Figure 1. 1. Nomenclature et géométrie d'aboutage (d'après le Centre Technique du Bois 1973).

où :

L : longueur

P : pas

$\beta$  : épaisseur de l'extrémité de l'enture

$\alpha$  : pente

S : jeu au fond de l'enture

H : largeur totale de l'assemblage

d'importance sur la capacité des joints tant que la surface des extrémités des entures demeure la même. Sunley (1980) souligne qu'en général les unions structurales ont des entures d'une longueur de 10 à 15 mm et des pas entre 3 et 4 mm. Walford (2000) a étudié l'effet de la longueur des entures sur la résistance en flexion et en traction du bois abouté de pin radiata. L'étendue des longueurs évaluées était de 3,5 mm à 16 mm et elle n'a pas d'impact sur la résistance mécanique du bois abouté du pin radiata. Par ailleurs, Raknes (1982) souligne que les entures courtes (7,5 mm à 10 mm) donnent moins de pertes de matériel et elles requièrent moins de puissance pendant l'usinage que les entures plus longues (plus de 20 mm). De plus, des pressions d'assemblage élevées peuvent être utilisées sans causer de dommages au joint du bois abouté. Les entures plus longues (50 mm à 60 mm) produisent des pertes et des dommages considérables. Les couteaux doivent être plus

robustes. D'après Raknes (1982), l'intervalle de longueur d'utilisation des entures est de 7,5 mm à 60 mm, mais le plus commun se situe entre 15 mm et 35 mm. En général, les aboutages non structuraux sont plus courts (moins de 10 mm) et présentent des extrémités émoussées. Les aboutages structuraux sont généralement plus longs (entre 22 et 28 mm) et présentent des extrémités plus aiguës. (Wisconsin Knife Works 2000).

Après la pente et la longueur des entures, l'épaisseur de l'extrémité de l'enture ( $\beta$ ) est le facteur le plus important affectant la résistance mécanique du joint. D'après Selbo (1963), les entures doivent être suffisamment longues et la pente relativement faible pour offrir une surface effective de collage suffisamment grande pour résister à une contrainte de cisaillement qui se rapproche de la résistance mécanique à la traction de la pièce. Si ces conditions sont rencontrées, l'épaisseur de l'extrémité de l'enture devient alors un facteur important de la résistance mécanique du joint. Une extrémité plus mince donne une plus haute résistance mécanique (Figure 1.2). D'autres auteurs soulignent l'importance de maintenir les extrémités des entures les plus minces possibles pour atteindre de meilleures performances. Strickler (1980) recommande ainsi que l'épaisseur des entures n'excède pas 0,8 mm. Jokerst (1980) mentionne que l'épaisseur des extrémités des entures doit être aussi faible que possible et le pas suffisamment grand pour éviter la concentration des contraintes à l'extrémité des entures. Richards (1958) souligne la difficulté à usiner des entures minces malgré leur résistance mécanique élevée.

En ce qui concerne le pas des entures, Pavlov (1954) mentionne qu'il n'y a pas d'effet sur la résistance mécanique du joint.

#### **1.4.2 Types de configurations de joints**

Le dessin des joints est de première importance car il affecte directement la résistance mécanique des joints structuraux. En général, la résistance mécanique diminue à mesure que la pente augmente. Selbo (1975) a exprimé la résistance mécanique à la traction longitudinale de divers types de joints par rapport à celle du bois massif (Figure 1.3). Les joints à entures multiples (fig. 1.3 B,C,D) présentent une bonne résistance à la traction longitudinale par rapport à celle du bois collé bout à bout (fig. 1.3 A). Le joint à

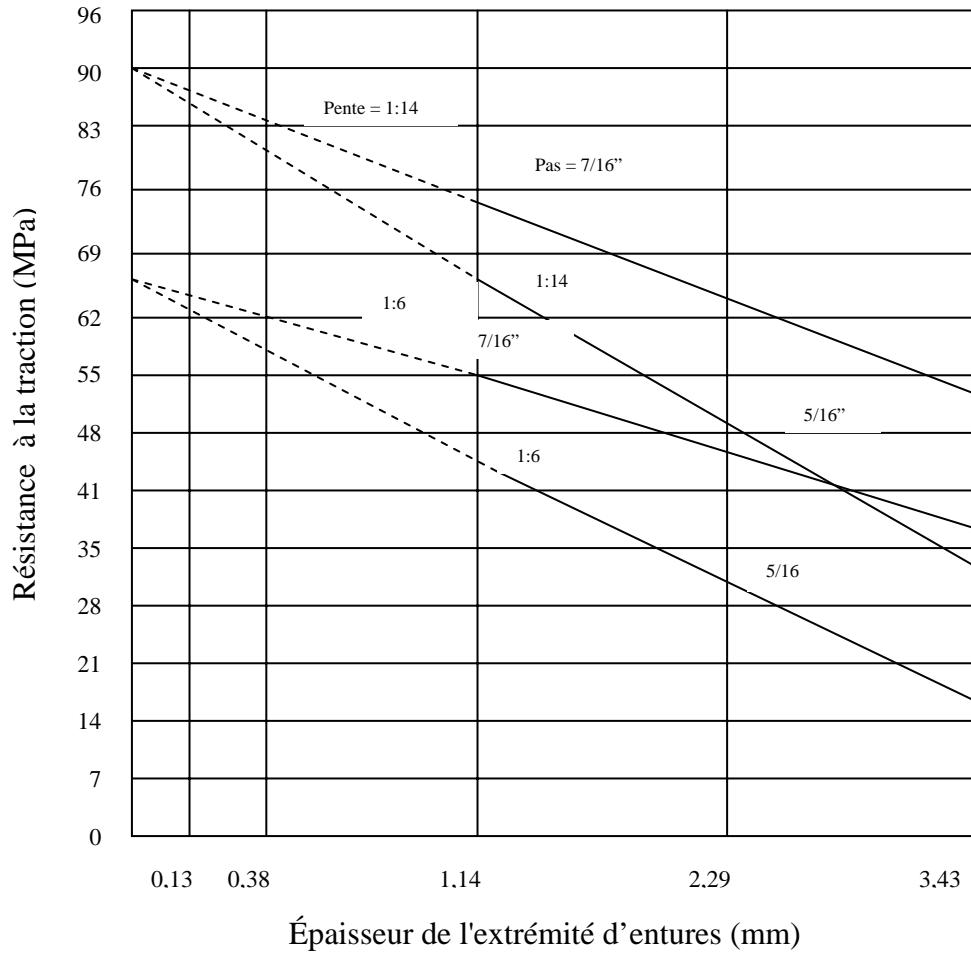


Figure 1. 2 . Effet de l'épaisseur de l'extrémité d'entures sur la résistance mécanique en traction longitudinale du bois abouté par entures multiples de sapin douglas (adapté de Selbo 1963).

biseau plat (fig. 1.3 E) est l'ancêtre des joints à entures multiples. La performance des joints à biseau plat a été étudiée par Jessome (1958), Stieda (1958), Richards et Goodrick (1959) et Selbo (1975a). Ce type de joint est le plus performant parmi tous les types de joints. Le joint à biseau plat n'a cependant pas connu beaucoup d'expansion puisqu'il engendre une grande perte de longueur et qu'il permet difficilement d'obtenir une bonne exactitude et une bonne précision dans l'alignement des blocs (Jokerst 1981).

Le premier inconvénient des joints à entures multiples est qu'ils ont nécessairement

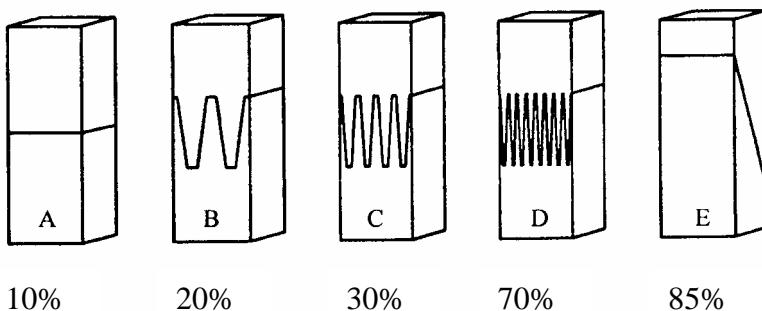


Figure 1. 3. Effet du type de joint sur la résistance mécanique à la traction par rapport à celle du bois massif (d'après Selbo 1975).

plusieurs points de concentration de contraintes, soit un à chacun des bouts des entures, ce qui réduit leur efficacité structurale par rapport à celle du joint de type biseau plat (River *et al.* 1991).

Les producteurs de bois abouté ont tendance à produire des joints à entures multiples avec des épaulements et des entures courtes parce qu'ils sont moins coûteux et plus faciles à fabriquer. Plusieurs configurations existent actuellement sur le marché telles que sans épaulement (feather), mâle-femelle et inversée (Figure 1.4) (ACEco Precision Wood Tooling 2000). Cependant, aucune information n'est disponible pour savoir celle qui offre une meilleure performance mécanique. Bryant *et al.* (1998) ont travaillé sur la géométrie des joints à entures multiples avec et sans épaulement. Les résultats ont suggéré que les entures multiples à épaulement ont tendance à avoir une mauvaise performance mécanique et un type de rupture fragile.

#### 1.4.3 Orientation des entures

Janowiak *et al.* (1993) ont évalué des joints à entures orientées horizontalement (joint dont le profil des entures apparaît sur la face étroite de la pièce), et verticalement (joint dont le profil des entures apparaît sur la face large de la pièce). Des essais mécaniques de flexion et de traction des deux types de joints ont été réalisés sur des petits échantillons de feuillus

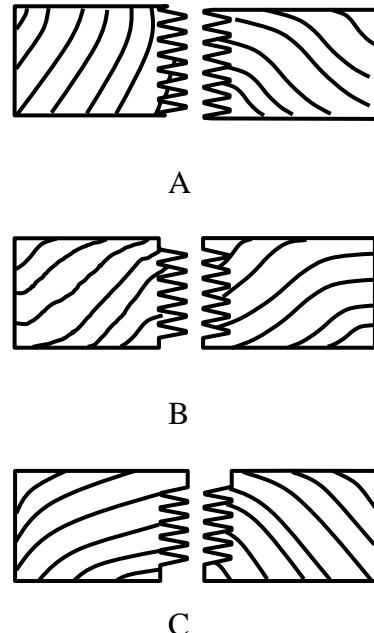


Figure 1. 4. Types de configuration des joints A: Sans épaulement, B: Mâle-femelle, C: Inversée.

(chêne rouge, érable rouge et tulipier) collés avec deux types d'adhésif (mélamine-formaldéhyde et résorcinol-formaldéhyde). Les comparaisons ont montré que les différences mécaniques attribuables, soit à l'orientation des entures ou soit au type d'adhésif ont été faibles. Les joints à entures verticales semblent cependant offrir une résistance supérieure autant en flexion qu'en traction. Cependant, le travail n'indique pas la manière dont les essais de flexion ont été conduits, soit sur rive ou sur plat. Par ailleurs, Tan (1993) a remarqué qu'en compression, le joint vertical est d'environ 29% plus fort que le joint horizontal chez le meranti tembaga. Jokerst (1981) mentionne également dans ce contexte que les joints à orientation verticale ont une meilleure performance en flexion que les joints horizontaux. Les contraintes se distribuent à travers toutes les entures pour le joint vertical, tandis que pour le joint horizontal, les entures extérieures supportent la plupart de la charge ce qui affecte son intégrité (Jokerst 1981).

#### 1.4.4 Conditions du bois

Les caractéristiques du bois affectent la fabrication des joints à entures multiples. On retrouve ainsi des problèmes reliés à la masse volumique, à la teneur en humidité, aux défauts (nœuds, moelle, gerces, etc), à la pente du fil et à la température du bois. Moody (1970) par exemple, a observé que la présence de moelle dans les joints diminue la résistance mécanique du bois de pin du sud. Les normes canadiennes NLGA 2000a et NLGA 2000b exigent alors une classification visuelle pour le bois. La taille et l'emplacement des nœuds et des fentes, l'inclinaison du fil, la flache et le gauchissement comptent parmi les facteurs qui doivent être pris en compte lors de la classification.

La masse volumique et l'humidité du bois sont deux caractéristiques qui affectent ses propriétés mécaniques (Bodig et Jayne 1982). Fröblom (1975) souligne que la masse volumique est un des aspects qui affecte également la résistance mécanique du bois à entures multiples. Ainsi, Samson (1985) a constaté que les changements de la masse volumique entre les blocs ont été les responsables de la variation rencontrée sur le module d'élasticité du bois abouté.

D'autre part, la plupart des propriétés mécaniques du bois augmentent lorsque la teneur en humidité diminue au-dessous du point de saturation des fibres. Ainsi, Green et Kretschmann (1994) et Kretschmann et Green (1996) ont trouvé, pour le bois massif, que les résistances mécaniques à la rupture en traction parallèle et perpendiculaire au fil du bois, augmentent à mesure que la teneur en humidité diminue. Elles atteignent un maximum entre 10% et 12%. Plusieurs travaux ont été réalisés par rapport à l'effet de la teneur en humidité sur le jointage de pièces. Par exemple, Troughton et Chow (1977, 1980) ont évalué des joints à entures multiples en utilisant la méthode de durcissement par préchauffage (LPFO) de Forintek, avec des teneurs en humidité variant entre 12% et 90%. Cette méthode consiste à chauffer la zone du joint en surface à l'aide d'un courant d'air chaud pour ensuite appliquer un adhésif de type thermodurcissable tel que le phénol-résorcinol formaldéhyde. La chaleur emmagasinée dans les entures permet la polymérisation rapide de la colle. Les résultats ont montré que la technique LPFO a un bon

potentiel pour ajouter de la valeur à la matière première. Par ailleurs, l'aboutage de bois vert a été possible grâce aux procédés tels que le New Zealand Greenweld, qui utilise un adhésif de type résorcinol-formaldéhyde mélangé avec durcisseur fait de paraformaldéhyde et une solution d'ammonium, le procédé US Soybean, basé sur une solution protéinique hydrolysée de soya et mélangé avec le phénol-résorcinol formaldéhyde et un catalyseur de type paraformaldéhyde, et le système de collage avec un adhésif à l'uréthane (Steele *et al.* 1998, Verreault 1999, Verreault 2000).

La teneur en humidité affecte les propriétés physiques et mécaniques du bois et par le fait même, son collage. Une fois collée, la pièce aboutée devrait avoir une humidité aussi proche que possible de celle requise en service. Dans la plupart des cas, il faut essayer d'atteindre une humidité du bois comprise entre 6% et 16%. De plus, l'écart d'humidité entre deux pièces qui seront collées ensemble ne devrait pas dépasser 5% (Association des manufacturiers de bois de sciage du Québec 1999). Le principal effet de la teneur en humidité sur le bois à abouter est de provoquer des inconvénients lors du pressage par haute fréquence (HF), utilisé principalement pour le durcissement des adhésifs phénol-résorcinol formaldéhyde. Lorsque l'humidité est supérieure à 15%, l'énergie des HF est déviée vers les surfaces les plus humides plutôt que sur le joint lui-même. Ce phénomène entraîne de sérieux problèmes car au Canada la plupart des bois commerciaux sont séchés au-dessus de 15% H (Turgeon 1981). La teneur en humidité du bois doit donc être contrôlée de façon à produire un collage le plus résistant. Il faut considérer également l'eau ajoutée par l'adhésif de manière à ce que l'humidité finale du produit soit celle requise en service (Centre technique du bois et de l'ameublement 1991).

Ngangué (2000) a étudié l'impact de la teneur en humidité sur la performance mécanique des joints d'épinette noire collés avec du phenol-résorcinol formaldéhyde. Des paires de blocs de bois de même teneur en humidité ont été testés à 8%, 12%, 16% et 20% H. Des combinaisons de paires de blocs à différentes teneurs en humidité ont été également évaluées. L'écart de teneur en humidité entre les paires était de 0%, 4%, 8% et 12% H. Le pressage de blocs fut fait par haute fréquence. La performance au collage a été évaluée à l'aide d'un essai de cisaillement à la ligne de colle. Une valeur optimale de 13,5% H fut

obtenue pour les blocs de bois ayant une même teneur en humidité. Cependant, aucune différence significative n'a été observée de 8% à 20% de teneur en humidité. D'autre part, des différences significatives ont été observées lorsque la teneur en humidité variait entre les blocs. D'après Ngangué (2000), une trop grande variation de la teneur en humidité fera que l'énergie destinée à la cuisson de l'adhésif sera absorbée plutôt par le bois, en diminuant ainsi le taux de réticulation de la colle. Shuler *et al.* (1979) ont indiqué que la performance mécanique en flexion de poutres d'épinette de l'est a été affectée par la teneur en humidité des joints lors de l'aboutage. Plus tard, Shuler (1980) a étudié le comportement du bois à entures multiples d'épinette de l'est pour trois teneurs en humidité (8%, 12% et 14% H) et pour trois temps d'assemblage (10, 20 et 30 minutes), sur les propriétés de traction et de flexion avec un adhésif de type phénol-résorcinol formaldéhyde. Aucune différence appréciable n'a été notée pour les conditions d'assemblage, quoique les échantillons de basse teneur en humidité (8%) ont montré de faibles contraintes à la rupture en traction et en flexion.

Les propriétés mécaniques du bois sont très sensibles à la présence de nœuds. Les semelles du bois jointé doivent alors être sélectionnées sans nœuds pour éviter des amorces de rupture. Leur influence est négligeable à l'axe neutre, même sur le comportement en cisaillement. Sur la partie comprimée d'une semelle, leur influence est très inférieure à celle sur la partie en traction (Bodig et Jayne 1982). D'après Samson (1980), les amorces de rupture sont reliées à des anomalies dans les membrures, correspondant principalement à des nœuds. Une distance minimale entre le nœud et la base des entures est donc généralement exigée. Cette distance est égale à trois fois le diamètre d'un nœud (Raknes 1982). Par ailleurs, Pellicane *et al.* (1987) ont rapporté que les nœuds de 6 mm à 13 mm de diamètre ont diminué la résistance mécanique à la traction de bois abouté. Il faut donc éviter la présence des nœuds près des joints.

Par ailleurs, la pente de fil, a une influence directe sur la résistance mécanique d'une pièce de bois. Plusieurs auteurs soulignent l'évolution des propriétés mécaniques du bois en fonction de l'angle des fibres (Kollmann et Côté 1968, Harris 1989, Forest Products Laboratory 1999). La résistance mécanique est très sensible aux variations de la pente du

fil. Une augmentation de la pente peut causer une réduction significative de la résistance mécanique (Forest Products Laboratory 1999). Kollmann et Côté (1968) par exemple ont constaté que la pente du fil a plus d'influence sur la résistance mécanique à la traction que sur celles en flexion et en compression. Les normes NLGA 2000a et NLGA 2000b tolèrent une certaine déviation du fil pour les différents degrés de classification du bois. La pente du fil est donc un paramètre important à considérer lors de l'optimisation de l'aboutage du bois.

La température du bois est une autre caractéristique qui peut influencer le collage du joint. Par exemple, elle peut modifier la viscosité de la colle utilisée. Une basse température peut impliquer un retard dans la prise de la colle tandis qu'une température élevée peut provoquer une diminution du temps de prise de la colle et activer le durcissement (Association des manufacturiers de bois de sciage du Québec 1999). La température du bois doit être supérieure à 18°C lorsque la colle est appliquée, ce qui nécessite un préchauffage du bois, du moins pour certaines régions du Canada et de la Scandinavie (Turgeon 1981). Sans préchauffage, un joint de phénol-résorcinol ou de résorcinol durcit à la température ambiante après 36 heures. Le bois froid ou gelé ne donne pas un joint satisfaisant, il est donc nécessaire de prévoir une surface d'entreposage suffisamment grande pour le bois dans les mois d'hiver (Turgeon 1981). Théoriquement, il est possible d'abouter des bois indépendamment de leur température à condition qu'une chaleur suffisante soit introduite dans la zone d'union pour durcir la colle (Raknes 1982).

#### **1.4.5 Le collage**

Les principes d'adhésion doivent être respectés surtout pour les aboutages de type structural. Les principes d'adhésion sont les suivants (Strickler 1980): a) obtenir des surfaces sans endommagement b) appliquer suffisamment d'adhésif pour chacune des entures afin de fournir un film continu dans l'interface de l'union c) mouiller chimiquement les deux surfaces pour les assembler d) s'assurer que les surfaces aient un bon contact au moment du durcissement de l'adhésif.

L'adhésif le plus utilisé dans les usines de jointage de Colombie-Britannique est le phénol-résorcinol qui assure un joint imperméable (Turgeon 1981). La colle est généralement appliquée sur les deux bouts des pièces à abouter à un taux de 27 à 36 kilogrammes de colle par  $92\text{ m}^2$  de surface de joints (Turgeon 1981). Le lien résultant avec l'adhésif phénol-résorcinol possède une haute résistance mécanique, un bon comportement au fluage, une haute résistance à l'humidité et une excellente longévité (Gardziella *et al.* 2000). La colle rigide phénolique utilisée aujourd'hui par la plupart des entreprises, produit une rigidité dans le joint. Par conséquent, les contraintes dans cette zone sont plus élevées, entraînant une augmentation des probabilités de rupture. Si les joints étaient moins rigides, à une même résistance, ils généreraient moins de concentrations de contraintes que les joints courants Pellicane *et al.* (1986). Cependant, la nature du substrat, la pression de collage, la quantité de colle utilisée et l'épaisseur du joint de colle, peuvent également influencer le comportement mécanique du joint. Murphrey et Rishel (1972) et Groom et Leitchi (1994), ont étudié l'effet de l'épaisseur de la ligne de colle sur la résistance mécanique de bois abouté. Les résultats ont indiqué qu'un joint de colle trop épais ou trop mince peut occasionner une faiblesse du joint. Ménard (1993) mentionne que l'épaisseur optimale est d'environ 0,1 à 0,25 mm pour le bois. Ainsi, un contrôle adéquat de l'épaisseur de la ligne de colle produira des joints plus résistants. Un travail similaire a été effectué par Ebewele *et al.* (1979) où l'énergie d'adhésion a bien été démontrée comme passant par un maximum pour un degré d'encollage intermédiaire.

Le procédé d'aboutage par entures multiples à l'aide d'un adhésif phénol-résorcinol formaldéhyde, débute par l'usinage des deux extrémités des pièces. L'adhésif est ensuite immédiatement enduit sur les entures produites par un système mélangeur et d'application. Les entures sont serrées ensemble et introduites dans une zone de durcissement où des plaques chaudes ou de radio fréquence sont utilisées pour durcir l'adhésif sous pression pendant une courte période de temps. Il s'agit souvent d'un processus en continu. Par conséquent, les adhésifs doivent posséder une vitesse rapide de durcissement sous ces conditions pour maintenir les pièces ensembles. Ceci est très important pour les chaînes de transport de la ligne de production puisque la vitesse y est habituellement rapide.

Par ailleurs, les adhésifs de type polyuréthane (PUR) sont en train de gagner du terrain en Amérique du Nord pour une variété d'applications structurales et non-structurales. Le bois abouté constitue un produit intéressant pour l'utilisation des adhésifs PUR. L'adhésif PUR offre de grandes possibilités étant donné que le processus de durcissement n'est pas limité par les mêmes conditions que les adhésifs phénoliques. L'humidité dans le bois ou dans l'air provoque le durcissement des adhésifs PUR sans avoir recours à aucun catalyseur ou aucune chaleur supplémentaire. Ces adhésifs ont alors été considérés comme une alternative pour l'aboutage du bois (Chen 2001, Lange *et al.* 2001, Verreault 1999). Ayarkwa *et al.* (2000b) ont essayé des colles de type isocyanate, résorcinol-formaldéhyde (RF) et melamine-formaldéhyde (MF) pour l'aboutage de trois bois tropicaux. Le type d'adhésif a eu un effet significatif sur les propriétés de flexion et de traction; celui de type isocyanate étant le meilleur. Cependant, la résine phénolique continue à être à ce jour l'adhésif préféré pour les composantes de bois collés à usage structural. Néanmoins, les perspectives d'utilisation des isocyanates deviennent de plus en plus importantes puisqu'elles ont démontré une bonne capacité pour le collage du bois à des fins structurales.

D'autre part, la commission nationale de classification de sciages (NLGA) a récemment développé une annexe qui permet l'utilisation des adhésifs de type isocyanate, tel que les PUR (National Lumber Grades Authority 2002). Dans ce contexte, le produit ISOSET®PEP peut donc être utilisé au Canada pour les applications des produits en bois d'ingénierie. Cet adhésif contient un polymère en émulsion aqueuse combiné à un polyuréthane. L'adhésif est un système à deux composants, soit une base de polymère émulsifiée et un prépolymère polyuréthane. Ces deux résines, désignées par UX-100 et WD3-A322, sont mélangées immédiatement avant leur utilisation pour former le polyuréthane (Ashland 2002, Conseil national de recherches Canada 2001). Peu de travaux sont disponibles qui aient utilisé cet adhésif pour l'aboutage du bois. King et Chen (2001) ont évalué la performance de l'adhésif ISOSET UX-100/A322 pour des applications de bois abouté et de poutrelles en I. Les performances mécaniques de cet adhésif furent de 10% à 25% plus élevées que celles des autres types d'adhésif commerciaux. Une vitesse rapide de durcissement de l'adhésif, une excellente résistance mécanique et une bonne durabilité pour

des applications à l'extérieur, sont quelques-uns des avantages que ces auteurs ont trouvés lors de leur étude. Par ailleurs, Vrazel (2002) a évalué les effets de l'espèce, du type d'adhésif et de la température de durcissement sur la résistance et la durabilité du bois abouté structural. Bien que l'adhésif résorcinol-formaldéhyde ait eu une meilleure performance en flexion et en traction des trois adhésifs évalués, l'ISOSET UX-100/A322 peut aussi être considéré comme un système très comparable à celui de type résorcinol-formaldéhyde. Dans ce contexte, une recherche sur le changement du type de colle du phénol-resorcinol, pour une colle d'isocyanate, peut être suggérée et ajoutée aux objectifs de ce projet.

Par ailleurs, l'effet du temps d'ouverture et d'assemblage sur la qualité de joint a été étudié par Troughton et Gee (1979). L'étude était basée sur l'adhésif phénol-résorcinol formaldéhyde (PRF). Ils ont établi que lorsque cet adhésif est appliqué pour le préchauffage des entures, les réactions de durcissement commencent à avoir lieu très rapidement. Étant donné que la chaleur dégagée dans les entures accélère les réactions de durcissement de l'adhésif PRF, les temps de l'ouverture jouent alors un rôle important dans la qualité des joints. Malheureusement, il n'existe pas d'information reliée à ce sujet pour les adhésifs de type isocyanate.

La pression à appliquer durant l'assemblage des joints à entures multiples joue un rôle déterminant dans la résistance finale du joint (Centre Technique du Bois 1973). Celle-ci permet le serrage des joints en forçant les entures les unes contre les autres afin de provoquer leur ancrage mutuel (Raknes 1982). L'information dans la littérature sur la quantité et la durée de la pression pour former des joints résistants est confuse et parfois contradictoire. Strickler (1980), par exemple, a recommandé des pressions de  $28 \text{ kg/cm}^2$  sur la section transversale des pièces pour la plupart de résineux. Par ailleurs Turgeon (1981) mentionne que cette pression se situe entre  $28$  et  $56 \text{ kg/cm}^2$  pour les bois mous (S-P-E) et entre  $42$  et  $70 \text{ kg/cm}^2$  pour le sapin douglas et le mélèze. On observe alors une tendance à augmenter la pression tant que le bois peut se tenir sans dommage. Turgeon (1981) mentionne qu'à mesure que la longueur des entures est augmentée, la pression finale doit être réduite pour éviter leur endommagement. Ceci se reflète dans la norme allemande DIN

68140 qui précise des minimums de  $120 \text{ kg/cm}^2$  pour des longueurs d'entures de 10 mm et de  $20 \text{ kg/cm}^2$  pour des longueurs d'entures de 60 mm. En aucun cas cette pression ne doit être inférieure à  $10 \text{ kg/cm}^2$  (Jokerst 1981).

Les différents procédés d'aboutage se distinguent par la méthode employée pour durcir le joint de colle. Si la méthode est à froid, la colle durcit à la température ambiante, sans apport de chaleur supplémentaire (Turgeon 1981). La méthode à froid est applicable aux conditions canadiennes en y incorporant un préchauffage des entures, cependant, celle-ci ne permet qu'un taux de production relativement bas, c'est-à-dire de 3 à 10 joints par minute (Turgeon 1981). Une méthode à l'aide d'un champ à haute fréquence (HF) est plus utilisée puisqu'elle permet un durcissement très rapide de la colle, avec un taux de production de 30 joints et plus par minute (37 à 40 mètres linéaires par minute en utilisant des longueurs de 1,2 mètres) (Turgeon 1981).

Le chauffage à haute fréquence consiste en la création d'un champ à HF (1 à 20 MHz) entre deux plaques d'un condensateur (les électrodes) et le bois à chauffer qui est l'isolant (ou diélectrique). On réalise ainsi un chauffage uniforme et très rapide du joint de colle. Le champ à HF passe par la zone la plus conductrice, c'est-à-dire l'adhésif, à condition que le bois lui-même ait une teneur en humidité inférieure à 14%. Sinon il y aura risque qu'une partie de l'énergie aille plutôt vers les régions à haute teneur en humidité (Centre Technique du Bois 1973).

Le chauffage du bois est appliqué pour accélérer le durcissement de l'adhésif et donner un meilleur rythme de production en assurant le collage (Raknes 1982). Frölich (1975) mentionne que plusieurs entreprises utilisent la méthode de chauffage par haute-fréquence et aussi la méthode par plaques chauffantes. Cependant, Raknes (1982) indique que la technique des plaques chauffantes n'est presque pas utilisée car les périodes de pressage sont très longues (20 à 30 secondes), ce qui retarde la production.

## 1.5 L'usinage du bois abouté.

Le procédé d'usinage du bois a besoin d'une attention spéciale car plusieurs facteurs peuvent affecter la performance des produits de bois abouté. Les paramètres d'usinage tels que l'avance par couteau et la vitesse de coupe sont parmi ceux qui peuvent affecter le procédé et la qualité du produit.

L'usinage de bois abouté est généralement fait en suivant les recommandations données par les fabricants des outils et des machines. Un mauvais aboutage et un arrachement excessif du bois peuvent survenir si les conditions de coupe ne sont pas adéquates (vitesse de coupe trop élevée, avance par couteau faible, couteaux émoussés, mauvais angle d'attaque, etc.) (ACEco 2000). Un usinage soigneux est essentiel afin d'obtenir une bonne qualité de la surface des entures afin d'assurer une application adéquate de colle.

La vitesse de coupe est la vitesse avec laquelle les couteaux passent à travers le bois et elle peut être exprimée comme suit:

$$V = \frac{\pi D N}{1000}$$

où:

V = Vitesse de coupe (m/min)

D = Diamètre du cercle de coupe du porte-outil (mm) (figure 5)

N = Vitesse de rotation (tr/min)

La vitesse de coupe a une importance déterminante sur la durée de vie des outils. Une augmentation de la vitesse de coupe génère une plus haute température de coupe et entraîne une réduction de la durée de vie des outils. La vitesse de coupe est alors limitée par la dureté du matériau à usiner et par la qualité du métal constituant l'arête de coupe de l'outil.

Par ailleurs, l'angle d'attaque dégage les copeaux et conditionne la pénétration de l'arête tranchante dans le bois (figure 1.5). Avec un angle d'attaque très élevé, le dégagement du

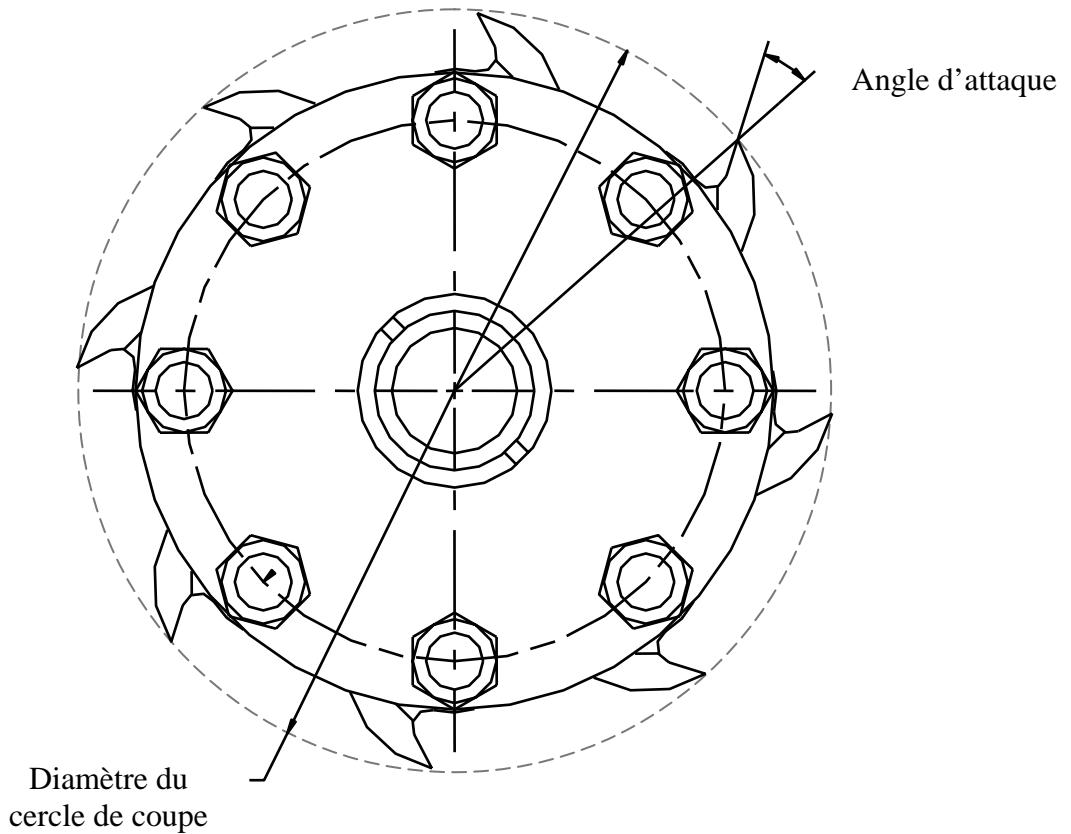


Figure 1. 5. Terminologie principale du porte-outil (d'après ACEco 2000).

couteau sera insuffisant ce qui causera un frottement élevé. Ce frottement engendre de la chaleur qui provoque l'usure de l'outil. De plus, le diamètre du cercle augmentera ce qui fera que les couteaux couperont excessivement. D'autre part, un angle d'attaque faible provoquera un effort important à la pénétration de l'arête tranchante dans le bois ce qui amènera une augmentation de la pression sur l'outil ainsi que son usure. Le diamètre du cercle de coupe diminuera en provoquant un arrachement excessif du bois.

D'autre part, l'avance par couteau est la quantité de matériel enlevé par chaque couteau pour un tour de l'axe. Le calcul de l'avance par couteau permet de déterminer si les couteaux sont trop sollicités dans les porte-outils et de fournir une référence sur la quantité de la force qui est appliquée à partir de chaque couteau sur le bois lui-même. À mesure que l'avance par

couteau augmente, les couteaux font augmenter la pression et la chaleur exercées sur le bois. Ces deux facteurs augmentent la vitesse de l'usure sur la face de coupe des couteaux réduisant ainsi le délai entre les affûtages. Un accroissement de l'avance par couteau contribuera également à un excès de bois arraché en raison de la pression élevée exercée par l'outil. À mesure que l'avance par couteau diminue, la pression exercée par l'outil va diminuer et généralement la chaleur aussi. Si l'avance par couteau est trop faible, les couteaux frotteront davantage et couperont moins efficacement. Ce frottement excessif fait que l'affûtage de l'arête tranchante se perd prématûrément et peut causer assez de brûlures au bois en empêchant la pénétration de la colle. D'ailleurs, ce frottement exigera aussi des énergies de coupe importantes. La détermination de l'avance par couteau peut être exprimée selon la formule que suit (ACEco Precision Wood Tooling 2000):

$$\text{Avance par couteau} = \frac{A}{n N}$$

où:

A = vitesse d'avance

n = nombre de couteaux

N = vitesse de rotation (tr/min)

Les avances par couteau peuvent être comparées si la longueur et la géométrie du joint sont égales. De plus grandes longueurs des entures enlèveront une plus grande zone de bois comparé à la même avance par couteau d'un joint plus court. ACEco Precision Wood Tooling (2000) recommande d'une part des avances par couteau entre 0,38 mm et 0,53 mm pour assurer une vie optimale à l'outil. Wisconsin Knife Works (2000) recommande d'autre part une valeur de 0,50 mm.

Par ailleurs, pour produire un bon joint, de bonnes surfaces devraient être usinées, exemptes de fil arraché ou de marques de couteau, et d'autres irrégularités de surface (Selbo 1975 b). Des surfaces endommagées ont été associées à une performance inférieure de

joints collés (River et Miniutti 1975, Murmanis *et al.* 1986, Reeb *et al.* 1998 et Kutscha et Caster 1997).

Peu d'information est disponible quant à l'effet des paramètres d'usinage du bois sur l'aboutage par entures multiples. Reeb *et al.* (1998) ont travaillé sur la qualité de bois abouté après 4, 6 et 32 heures d'usure des couteaux. Les résultats ont montré qu'à mesure que l'usure des couteaux augmente, la quantité de cellules écrasées, la rugosité et les surfaces irrégulières augmentent également. L'utilisation de couteaux appropriés est très importante dans la fabrication du profil des bouts. Selon Turgeon (1981), des couteaux peuvent servir pendant huit heures pour les épinettes et le sapin, et quatre heures avec le sapin douglas et le mélèze. Par ailleurs, Fröblom (1975), a remarqué que les erreurs les plus courantes chez les industriels du bois abouté étaient de profiler les blocs avec des outils désaffûtés, de commettre des erreurs lors de l'affûtage, de faire une mauvaise installation des couteaux et de générer un ancrage déficient des pièces.

Collins et Walford (1998) ont étudié les effets de la vitesse d'avance et de coupe ainsi que des marques de couteaux sur la qualité du bois abouté de pin radiata. Les résultats ont montré que les paramètres d'usinage avaient peu d'effet sur la résistance mécanique du joint. D'autre part, d'après un sondage effectué dans cinq usines d'aboutage de bois de l'Est du Canada, il a été constaté que diverses conditions d'avance par couteau et de vitesse de coupe étaient utilisées (ANNEXE A). Il n'y avait pas un consensus sur les meilleurs paramètres pour abouter le bois d'épinette noire. L'évaluation de l'effet de la vitesse de coupe et de l'avance par couteau sur le bois d'épinette noire fut donc considérée nécessaire dans le cadre de notre étude.

Pour entraîner une pression de contact uniforme et pour obtenir des performances mécaniques élevées, les surfaces doivent être planes et sans arrachement. L'état de la surface a une grande influence sur les échanges interfaciaux entre les adhésifs et les substrats soit l'absorption et l'adsorption (étalement), l'épaisseur et la régularité d'épaisseur de l'union (Centre technique du bois et de l'ameublement 1991). Un mauvais usinage a pour résultat d'engendrer des surfaces rugueuses avec des dommages aux fibres du bois. Les

surfaces rugueuses et endommagées limiteront le mouvement de l'adhésif lors de son application, ce qui forme une faible couche d'assemblage. Ceci a pour résultat de générer des joints de basses performances mécaniques. Sans contredit, une surface adéquate sans dommage est essentielle pour obtenir de bonne performance mécanique. Cet objectif exige que les couteaux soient correctement affûtés et bien entretenus (Sellers *et al.* 1988). En conséquence, l'influence des paramètres d'usinage sur la qualité du joint est un aspect primordial à considérer dans l'optimisation de l'aboutage du bois.

## **1.6 Évaluation microscopique des surfaces du bois obtenues par divers procédés d'usinage**

Plusieurs études ont été effectuées afin d'évaluer la qualité de la surface obtenue suite à l'utilisation de différents procédés d'usinage (River et Miniutti 1975, Stewart et Crist 1982, Caster *et al.* 1985, Murmanis *et al.* 1986, Stehr et Östlund 2000). Caster *et al.* (1985) ont évalué l'aptitude des surfaces du bois poncé à former de lignes de colle résistantes. Le bois de sapin Douglas et de pins du sud a eu une résistance au cisaillement très faible après un vieillissement sous l'eau bouillante. Les analyses microscopiques ont montré qu'une grande surface de cellules endommagées fut produite par le procédé de ponçage. Stewart et Crist (1982) ont aussi aperçu un endommagement important des cellules suite au ponçage et au rabotage du bois. Murmanis *et al.* (1986) ont examiné la qualité de la surface de bois poncés avec différentes conditions de vitesses d'avance et de profondeurs de coupe ainsi qu'avec de dimensions variables de grain abrasif. Les résultats ont montré que la grandeur du grain abrasif, la structure du bois et la masse volumique semblent affecter beaucoup plus la profondeur et le type de dommage que la vitesse d'avance et la profondeur de coupe. De plus, le dommage des cellules était plus important chez le bois initial. Par ailleurs, River et Miniutti (1975) ont aussi examiné des surfaces obtenues par trois méthodes d'usinage, soit le dégauchissage, le rabotage et le sciage. L'endommagement était plus faible pour les surfaces dégauchies, moyen pour les surfaces rabotées, et plus important pour les surfaces sciées.

Kutschka et Caster (1987) ont évalué, sous microscope, les caractéristiques associées au bois abouté de pruche-sapin qui peuvent expliquer une faible résistance

mécanique. L'endommagement de cellules fut plus souvent produit sur le bois initial que sur le bois final. Cependant, il est possible qu'une pression de vapeur élevée causée par la presse à haute fréquence, plutôt que l'usinage des entures, puisse expliquer le dommage de cellules. Ayarkwa *et al.* (2000b) ont évalué la performance mécanique des joints à entures multiples de trois bois tropicaux. Ils ont aussi utilisé la technique d'analyse par microscope électronique pour observer la surface des joints collés cherchant des explications au niveau de la performance mécanique pour ces trois bois. Les résultats ont montré de bonnes performances mécaniques chez les espèces obeche et makore. Le lumen de cellules près de la surface de ces espèces étaient remplis d'adhésif. La performance du bois de maobi a été plus faible, ce qui a été expliqué par une mauvaise pénétration de l'adhésif dans les cellules.

La plupart des auteurs mentionnés précédemment soulignent qu'une surface endommagée est associée à une faible performance du bois collé. En conséquence, l'analyse microscopique des surfaces collées peut constituer un bon critère pour quantifier le dommage des cellules et analyser par le fait même la qualité des joints à entures multiples.

### **1.7 Techniques utilisées pour l'évaluation de la performance du bois abouté**

Plusieurs auteurs ont travaillé avec la technique des éléments finis pour évaluer la performance du bois abouté (Leitchi 1988, Qu et Fan 1988, Pellicane et Moody 1988, Pellicane 1994, Pellicane *et al.* 1994, Smardzewski 1996, Serrano 1997, Serrano et Gustafsson 1997). En général, leurs conclusions ont été similaires à celles obtenues par des études expérimentales. La technique des éléments finis a été conçue pour la modélisation et la simulation numérique. Cette technique consiste à proposer un modèle numérique de base, lequel est raffiné par la suite par des essais expérimentaux et finalement validé. La méthode des éléments finis permet de résoudre des problèmes de physique et de mécanique où des équations différentielles avec conditions aux limites sont utilisées.

Par ailleurs, Sandoz *et al.* (1994) ont utilisé la technique de l'holographie pour enregistrer et reproduire des images en trois dimensions en utilisant les interférences de deux faisceaux laser. Les images holographiques des modèles de déformation des bouts de joints testés à la traction ont montré divers effets négatifs sur la résistance mécanique du

bois abouté. Pellicane *et al.* (1995) ont utilisé une méthode de photographie optique pour mesurer la distribution de contraintes sur le bois abouté et ils ont trouvé que la méthode a été jugée adéquate.

Par ailleurs, Hernández (1998) a utilisé la technique d'interférométrie de Moiré pour caractériser la distribution de contraintes sur le bois abouté. L'interférométrie de Moiré a été employée pour obtenir les modèles des franges de l'échantillon de bois abouté soumis à la traction. D'après les modèles de franges de Moiré, les contraintes longitudinales, transversales et de cisaillement ont été calculées dans divers endroits du profil de joint. Des contraintes ont été observées près des extrémités des joints. Celles de cisaillement ont aussi été observées à travers la ligne de colle.

Ayarkwa *et al.* (2001a, 2001b) ont travaillé avec des émissions acoustiques pour prédire la contrainte maximale en traction longitudinale (UTS) et le module de rupture en flexion du bois abouté de trois espèces africaines. Les émissions acoustiques générées durant les essais de traction et flexion ont montré des résultats différent selon le type de profil du joint et selon l'espèce utilisée. Ils ont donc constaté que c'est une technique non destructive utile pour la prédition de la résistance de l'UTS et du module de rupture de ces trois espèces de bois.

## **1.8 Caractéristiques mécaniques d'une poutrelle en I et normes exigées lors du jointage**

Au Québec, 85% du bois utilisé pour la fabrication de poutrelles en I est de l'épinette noire (Ménard 2000). Celles-ci sont formées de semelles en bois abouté, en haut et en bas, avec une âme en panneau (OSB ou contreplaqué). Les poutrelles en I permettent une utilisation rationnelle de la matière première, surtout en flexion. Les semelles ainsi, vont être sollicitées soit en compression ou en traction. La contrainte de traction maximale se produit sur le côté convexe de la poutre, soit sur la semelle inférieure alors que la contrainte de compression maximale se retrouve sur la face concave de la poutre, soit la semelle supérieure. Ces deux semelles équilibrivent le moment fléchissant. Par ailleurs, une fibre intermédiaire, dite "fibre neutre", ne subit pas de changement. Les contraintes normales sont concentrées dans les semelles, tandis que l'âme supporte la quasi-totalité du

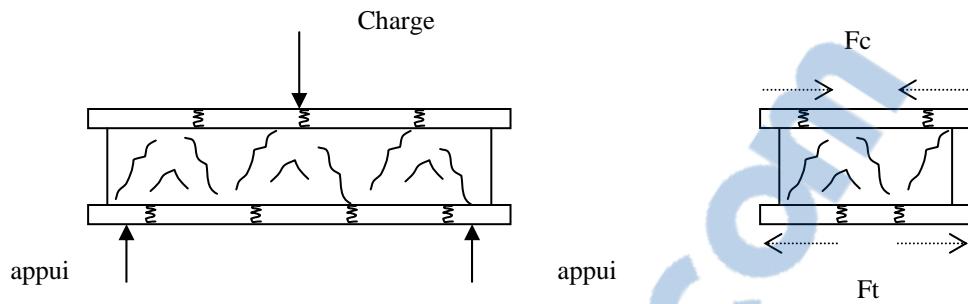
cisaillement (Samson 1980, Leitchi *et al.* 1990, Ménard 2000), (Figures 1.6 et 1.7). Les semelles sont assemblées longitudinalement par des entures multiples. Il arrive que la semelle tendue rompe en traction au niveau des joints d'aboutage. Ainsi le point critique d'une poutrelle est en général la semelle inférieure (Samson 1980, Leitchi *et al.* 1990, Ménard 2000).

Les semelles sont très sensibles aux joints défaillants et globalement, ce type de contact est un compromis entre le collage, l'usinage du bois et les conditions d'application et de prise de la colle. Le joint de colle présente deux types de contraintes, soit le cisaillement dans le plan de collage ( $\tau$ ) et la traction perpendiculaire ou transversale du plan de collage ( $\sigma_{T\perp}$ ), (Figure 1.8). Selbo (1963) a suggéré, pour obtenir des résistances mécaniques maximales, qu'une grande zone d'union collée et des entures minces soient exigées afin de développer une résistance au cisaillement élevée. De cette manière, la résistance mécanique de l'aboutage dépendra de la résistance au cisaillement parallèle au grain de pièces aboutées.

Ainsi, le comportement à la traction de la semelle et le cisaillement de l'épinette noire au niveau du collage sont des aspects à prendre en compte lorsque des performances mécaniques établies par les normes sont exigées.

L'évaluation du produit est réalisée autant pour le joint que pour le bois. La commission nationale de classification de sciages (NLGA) propose les normes SPS-1-2000 (National Lumber Grades Authority 2000b), pour le bois jointé à usage structural, où toutes les pièces sont soumises aux épreuves de flexion et de traction, et propose aussi la norme SPS-3-2000 (National Lumber Grades Authority 2000c), pour le bois abouté en colombages à usage vertical seulement, où les pièces sont soumises aux épreuves de flexion. Par ailleurs, la norme SPS-4 (2001) (National Lumber Grades Authority 2001) s'applique aux semelles de poutrelles de bois abouté classées mécaniquement (MSR) et la norme SPS-5 (2003) pour les colombages verticaux de bois lamellé-collé et abouté.

La norme NLGA (National Lumber Grades Authority 2001a), qui établit des règles



Fc: Contrainte de compression  
Ft: Contrainte de traction

Figure 1. 6. Schéma d'une semelle soumise à une contrainte de compression en haut et à une contrainte de traction en bas.

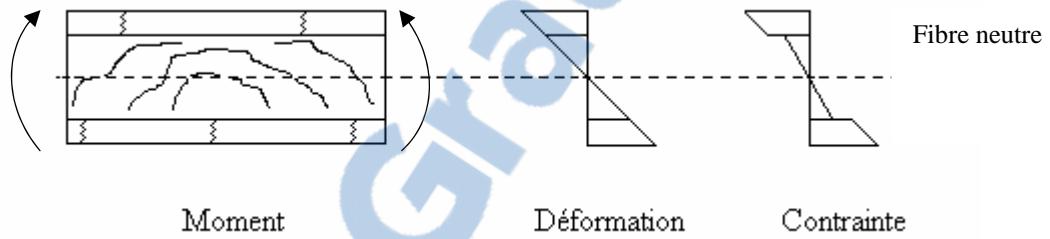
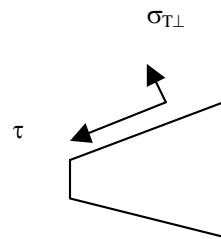


Figure 1. 7. Distribution des contraintes et des déformations dues au moment de flexion en comportement élastique d'une poutre à âme mince symétrique, où les semelles sont affectées par la compression en haut et par la traction en bas. (adapté de Samson 1980, Leitchi *et al.* 1990 et Ménard 2000).



$\tau$ : Cisaillement du plan de collage  
 $\sigma_{T\perp}$ : Traction perpendiculaire ou transversale au plan de collage

Figure 1. 8. Décomposition des efforts sur la surface de collage d'une enture. (adapté de Bergeron *et al.* 1979, Sandoz 1984 et Ménard 2000).

de classification pour le bois d'œuvre canadien, fournit les exigences de classification visuelle et donne les dimensions maximales, les caractéristiques permises de nœuds, de fentes, l'inclinaison du fil, la flache, le gauchissement, etc.

### **1.9 Exigences de performance lors des essais mécaniques sur bois massif et sur bois abouté d'épinette noire**

L'évaluation de la performance du bois abouté d'épinette noire pour usage structural au moyen d'un essai de traction est adéquate, car cette propriété est indicative d'un bon collage et simultanément de la résistance de la pièce collée.

Lorsque les contraintes normales à l'une des directions d'orthotropie atteignent la valeur limite, la rupture du matériau se produit. Comme il a été dit précédemment, dans la semelle, la contrainte de traction maximale se produit sur le côté convexe de la poutre (semelle inférieure) et la contrainte de compression maximale se retrouve sur la face concave de la poutre (semelle supérieure). C'est pourquoi la rupture en flexion risque de s'amorcer en traction ou en compression (Ménard 2000).

Bodig et Jayne (1982) et Jessome (2000), présentent les résultats de propriétés mécaniques de l'épinette noire (tableaux 1.2 et 1.3). Les propriétés mécaniques évaluées au Canada par Jessome (2000) sont légèrement supérieures à celles publiées par Bodig et Jayne (1982). Cette différence peut être attribuée aux caractéristiques de l'endroit où l'arbre croît ce qui fait que la masse volumique de l'épinette noire du Canada soit plus grande que celle de l'épinette noire des États-Unis. Malheureusement, ni Bodig et Jayne (1982), ni Jessome (2000) n'ont donné de valeurs de résistance en traction parallèle. Barrett et Lau (1994) ont présenté les propriétés mécaniques des colombages du groupe de bois sapin-épinette-pin en fonction de la qualité (tableau 1.4). Les données mentionnées par Barrett et Lau (1994) ne font pas mention des colombages de 2x3 et en plus, les auteurs ont mentionné des valeurs de résistance à la traction à la rupture (UTS) pour les bois sapin-épinette-pin et non pour l'espèce de l'épinette noire seulement.

La norme SPS-1 (National Lumber Grades Authority. 2000b) donne les exigences

Tableau 1. 2. Propriétés mécaniques de l'épinette noire provenant des Etats-Unis, testé à l'air et ajusté à une humidité de 12 pourcent (d'après Bodig et Jayne 1982)

Flexion statique				Compression parallèle				Cisaillement		Masse volumique basale	
MOR		MOE		Contrainte maximale à la rupture				Moyenne	É.-Type	Moyenne	É.-Type
Moyenne	É.-Type	Moyenne	É.-Type	Moyenne	É.-Type	Moyenne	É.-Type	MPa	kg/m <sup>3</sup>	MPa	kg/m <sup>3</sup>
71,3	5,9	10500	1613	36,7	3,2	7,1	0,6		380		38

Tableau 1. 3. Propriétés mécaniques de l'épinette noire croissant au Canada, testé à l'air et ajusté à une humidité de 12 pourcent (d'après Jessome 2000).

Flexion statique				Compression parallèle				Cisaillement		Masse volumique basale	
MOR		MOE		Contrainte maximale à la rupture				Moyenne	É.-Type	Moyenne	É.-Type
Moyenne	É.-Type	Moyenne	É.-Type	Moyenne	É.-Type	Moyenne	É.-Type	MPa	kg/m <sup>3</sup>	MPa	kg/m <sup>3</sup>
78,3	10,4	10400	2319	41,5	6,2	8,7	0,9		406		38

Tableau 1. 4. Valeurs de contrainte à la rupture en traction longitudinale (UTS) pour le groupe de bois sapin-épinette-pin. (d'après Barrett et Lau 1994).

Dimensions nominales (pouces)	Grade	UTS (MPa)		
		Moyenne	5 <sup>e</sup> centile	Minimum
2x4	Structure choisie	30,86	16,34	15,79
	#1	28,38	14,98	14,68
	#2	23,27	9,69	9,45
2x8	Structure choisie	24,92	12,02	11,34
	#1	23,65	10,69	10,42
	#2	19,53	8,20	7,86

relatives aux tests de flexion et de traction pour le bois structural abouté (Tableau 1.5). La norme exige que les tests se fassent sur au moins 20 échantillons de rive et 20 échantillons à plat pour les essais en flexion et 20 échantillons pour les essais en traction.

Tableau 1. 5. Exigences pour les test de flexion et de traction selon la norme SPS-1  
(National Lumber Grades Authority 2000b).

Dimensions nominales (pouces)	Classes	Test de flexion de rive et à plat (MPa)			Test de traction (MPa)
		MOR moyenne	MOR minimum	5e centile	
2x3 et 2x4	Structure choisie	48,9	32,7	36,7	10,1
	N°1/N°2	34,5	23,1	25,8	6,8
	N°3/colombage	23,0	15,8	17,7	4,4
2x6	Structure choisie	40,3	26,9	30,2	8,7
	N°1/N°2	28,5	19,0	21,3	5,9
	N°3/colombage	19,5	13,0	14,6	3,9

Par ailleurs, les normes ASTM D 4688 et SPS-4 (2001) (National Lumber Grades Authority 2001) présentent six modes de rupture qui peuvent affecter les joint à entures multiples (Figure 1.9). Selon ces normes, les modes de rupture 1 et 2 sont ceux liés à la performance de l'adhésif. Pour le mode de rupture 1, la rupture est observée tout au long de la surface de collage du profil avec peu de bris dans la fibre de bois (moins de 70%). Pour le mode de rupture 2, la rupture se produit tout au long de la surface de collage du profil aussi, mais avec un bon bris de cisaillement du bois (bris du bois > 70%). Le mode de rupture 3 se produit principalement dans la zone du joint. Quelques ruptures du bois à la racine et/ou à la pointe des entures, sont produites tout au long de la surface de collage. Le mode de rupture 4, survient principalement sur les racines et/ou bouts des entures. Dans le mode de rupture 5 le bris commence dans le joint et continue à l'extérieur de celui-ci (essentiellement 100% de bris du bois). Avec le mode 6, le bris survient complètement à l'extérieur du joint, alors il n'est pas influencé par la présence du joint. Les modes 3 à 6 sont indicatifs d'une rupture au niveau du bois, ce qui nous permettre d'établir qu'il n'y a pas un problème par rapport au collage du bois. Cependant, il faut éviter de considérer le mode de rupture 6 lors de l'évaluation de la performance mécanique des joints parce que ce serait le signe de la présence d'un défaut majeur dans le bois et donc la rupture ne serait pas

contrôlée par le joint lui-même. Le mode de rupture à la traction pour le joint abouté est donc un critère important parce qu'il est indicatif d'un collage adéquat. Par ailleurs, l'adhérence au substrat est le problème le plus critique dans la technologie des adhésifs (Kinloch 1987). L'adhérence est essentielle pour le succès de bons liens. Cependant, en pratique, on note habituellement que lorsque les joints ont été bien faits, ils peuvent également se briser. La rupture peut avoir lieu autant dans le bois massif que dans la colle elle-même (amorce dans le joint de colle due à une bulle ou à une microfissure) (Kinloch 1987, Pizzi et Mittal 1994).

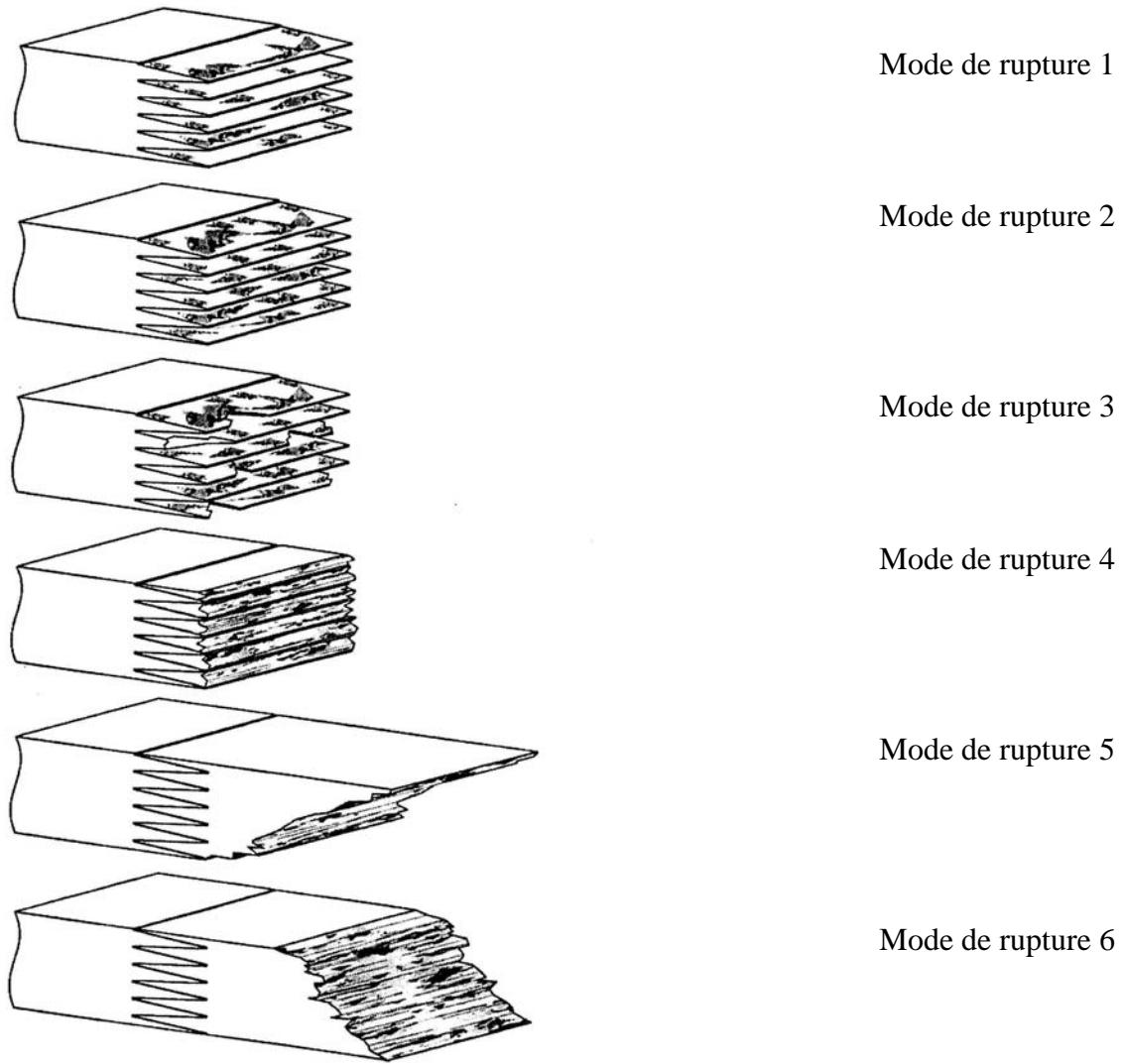


Figure 1. 9. Différents modes de bris du bois abouté. (D'après ASTM D-4688 et SPS4-2001).

## **Chapitre II**

### **Effet de la teneur en humidité d'équilibre et de la température du bois sur la résistance à la traction du bois d'épinette noire abouté par entures multiples**

#### **2.1 Résumé**

Des essais ont été effectués afin d'étudier l'influence de la teneur en humidité et de la température du bois lors de l'aboutage par entures multiples du bois d'épinette noire. Des groupes de blocs de bois ont été conditionnés à des teneurs en humidité de 12%, 17% et 20% H. Vingt-quatre heures avant l'usinage et collage, la température des blocs a été amenée à -5°C, 5°C, 12°C ou 20°C. Un total de dix combinaisons de teneur en humidité et de température du bois lors de l'usinage et du collage ont été étudiées. La résistance mécanique des joints obtenue sous les différentes conditions d'essai a largement dépassée les exigences de la norme NLGA SPS-1. Cependant, le bois abouté et collé à une température de -5°C a montré la plus basse résistance à la rupture en traction longitudinale. Le comportement mécanique des joints collés à des températures de 5°C, 12°C et 20°C fut semblable. L'étude de l'effet de la teneur en humidité sur l'aboutage du bois d'épinette noire s'est avérée peu concluante. Ainsi, la résistance mécanique des joints a augmenté à mesure que H diminue de 20% à 12%, mais cela n'a été observé qu'à 20°C. Une étude approfondie utilisant notamment des techniques de réduction de la variance mérite donc d'être réalisée.

## 2.2 Abstract

The influence of moisture content and temperature of wood during finger-jointing was studied. Wood specimens were equilibrated to obtain 12%, 17% and 20% moisture content (MC). The temperature of wood blocks were brought to either -5°C, 5°C, 12°C or 20°C twenty four hours before machining and gluing process. In total, ten combinations of wood moisture contents and temperatures were investigated. The average ultimate tensile strength of finger-joints fabricated using various temperatures and moisture content treatments met the tensile strength requirements outlined in the Canadian National Lumber Grades Authority (NLGA) SPS 1-2000. However, finger-joints made with wood machined and glued at -5°C exhibited the lowest ultimate tensile strength. The mechanical performance of finger-joints machined and glued at 5°C, 12°C and 20°C was similar. The study of the effect of the moisture content on finger-joined black spruce was not very conclusive. Ultimate tensile strength of finger-joints was found to increase as moisture content decreased from 20% to 12%. However, that was observed only at 20°C. There is a need to expand on this study using reduction of variance techniques to determine the real impact of moisture content on the performance of finger-joined black spruce.

## 2.3 Revue de littérature

Le matériau bois est souvent exposé à diverses conditions environnementales avant et durant son travail dans une usine d'aboutage. L'entreposage du bois entraîne des problèmes liés à la teneur en humidité et à la température car les conditions ambiantes à l'intérieur de l'usine demeurent souvent non contrôlées. La température du bois est considérée très importante spécialement dans des pays tels que le Canada, lequel est caractérisé par des grandes différences de température entre l'hiver et l'été et même à l'intérieur d'une même saison. Les conditions de teneur en humidité et de température au moment du collage requièrent alors d'être considérées lors de la fabrication de produits structuraux de bois abouté. Cependant, peu d'information existe quant à l'effet de ces variables sur le comportement au collage du bois d'épinette noire.

La teneur en humidité (H) a des effets importants sur les propriétés mécaniques du bois, lesquels doivent être bien compris et pris en considération pour l'usage structural du bois. Gerhards (1982) a analysé les résultats de plusieurs travaux traitant les effets immédiats de la teneur en humidité et de la température sur les propriétés mécaniques du bois. Ces travaux ont été réalisés sur des échantillons de bois libres de défauts. La plupart des propriétés mécaniques augmentent à mesure que la teneur en humidité du bois diminue, lorsque cette dernière se situe en dessous du point de saturation des fibres (environ 30% H) (Green et Evans 2001). Ces propriétés augmentent également à mesure que la température diminue (Gerhards 1982). La plupart des études évaluées par Gerhards (1982) indiquent que la résistance maximale du bois en traction parallèle (UTS) se situe entre 4% et 8% de teneur en humidité (H). Toutefois, l'effet de l'humidité sur les propriétés mécaniques pour les grandes pièces de bois présente un comportement différent. Ainsi, Green et Kretschmann (1994), Kretschmann et Green (1996) et Green *et al.* (2003a) ont rapporté que la résistance maximale en traction parallèle est atteinte à une teneur en humidité variant entre 10% et 12% (H). Une recherche récente faite sur des colombages a montré que le module de rupture en flexion et l'UTS sont plus faibles à 4% H (15% d'humidité relative) qu'à 15% H (65% d'humidité relative) (Green et Evans. 2003b).

Par ailleurs, la teneur en humidité du bois lors du collage doit tenir compte de celle présente dans l'adhésif. En effet, l'humidité du bois et de l'adhésif affecteront considérablement le processus de mouillage, de pénétration et de durcissement de ce dernier. En général, les adhésifs aqueux collent d'une manière satisfaisante à des teneurs en humidité variant de 6% à 14% H. Cependant, on peut travailler à des gammes d'humidité plus élevées à l'aide des adhésifs ou des procédés spécialisés (Suomi-Lindberg *et al.* 2002). Par exemple, de résultats satisfaisants pour le collage du bois vert ont été obtenus par une technique d'impression des entures à l'aide d'un gabarit (Strickler 1970). D'autre part, Verreault (1999, 2000) a eu recours à des procédés tels que le New Zealand Greenweld, qui utilise un adhésif de type résorcinol-formaldéhyde mélangé avec le paraformaldéhyde et une solution d'ammonium, le procédé "US soybean" qui utilise une solution protéinique hydrolysée de soya mélangé avec le phénol-résorcinol formaldéhyde et un catalyseur de type paraformaldéhyde ainsi que le procédé à l'uréthane.

D'autre part, Shuler *et al.* (1979) ont indiqué que la performance mécanique en flexion de poutres d'épinette de l'est a été affectée par la teneur en humidité des joints lors de l'aboutage. Plus tard, Shuler (1980) a évalué la résistance en traction et en flexion du bois abouté d'épinette de l'est en fonction du temps d'assemblage (10, 20 et 30 min) et de la teneur en humidité (8%, 12% et 14% H). Le bois abouté à faibles teneurs en humidité a montré moins de ruptures dans le bois et une résistance inférieure en traction à la rupture. Cependant, les analyses statistiques ont montré que ni la teneur en humidité, ni le temps d'assemblage n'ont été les principaux responsables de la faible performance du bois abouté. Néanmoins, le but de l'étude de Shuler (1980) était d'observer les caractéristiques de collage plutôt que la performance mécanique. De plus, l'utilisation de petits échantillons, a probablement affecté les conclusions de son étude.

Ngangué (2000) a étudié l'impact de la teneur en humidité sur la performance mécanique des joints à entures multiples d'épinette noire collés avec du phénol-résorcinol formaldéhyde. Cependant, les essais furent plutôt faits sur des petits blocs et non sur du bois abouté. Des paires de blocs de bois de même teneur en humidité ont été collés à 8%, 12%, 16% et 20% H. Des combinaisons de paires de blocs à différentes teneurs en humidité ont été également évaluées. Les écarts de teneur en humidité entre les paires furent ainsi 0%, 4%, 8% et 12% H. La performance au collage a été évaluée à l'aide d'un essai de cisaillement à la ligne de colle. Aucune différence significative a été observée entre les niveaux de 8% à 20% H. Cependant, d'après une analyse de régression, une valeur maximale et donc optimale de 13,5% H fut estimée pour les blocs de bois ayant une même teneur en humidité. D'autre part, des différences significatives ont été observées lorsque la teneur en humidité variait entre les blocs. D'après Ngangué (2000), une variation trop grande de la teneur en humidité, lors de l'utilisation de fours à radio fréquence, fera que l'énergie destinée à la cuisson de l'adhésif sera absorbée plutôt par le bois, en diminuant ainsi le taux de réticulation de la colle.

## 2.4 Matériel et méthodes

Les essais ont été effectués avec des colombages d'épinette noire à l'état sec de 38 mm x 64 mm de section, provenant de la région de Chibougamau, au Québec. Les défauts des

pièces ont été enlevés par l'eboutage de blocs de 20 cm à 91 cm de longueur et répondant alors aux critères de qualité N° 2 et Meilleur de la Commission Nationale de Classification des Sciages (National Lumber Grades Authority 2000a et National Lumber Grades Authority 2000b).

Les blocs ont été placés dans des chambres de conditionnement réglées à 20°C et 65% d'humidité relative (HR), à 22°C et 78% HR et à 2°C et 85% HR. Les humidités nominales d'équilibre furent respectivement de 12%, 17% et 20% H. Ensuite, les blocs équilibrés à 12% et 20% H furent conditionnés à quatre températures (-5°C, 5°C, 12°C et 20°C) pour environ 24 heures avant l'usinage et le collage des entures. Les blocs à 17% H n'ont été amenés qu'à deux températures soit 5°C et 20°C. Ces températures ont été atteintes dans une chambre de climatisation PGC 500 CFM Climate-LAB-AA, modèle N° AA-5470. Un trou de 20 mm de profondeur et 2,4 mm de diamètre, percé sur la face la plus large des blocs, a permis d'insérer un thermocouple et contrôler ainsi le niveau de température désiré. Quelques minutes avant l'usinage et le collage, les blocs étaient enlevés de la chambre de climatisation, enveloppés dans des sacs à plastique et mis à l'intérieur d'une boîte de polystyrène pour maintenir les conditions de température et d'humidité du bois constantes. Les blocs étaient alors usinés et collés dans les 30 secondes suivant leur enlèvement de la boîte de polystyrène. Une machine d'aboutage de *Conception RP 2000* a été employée pour la fabrication des entures. Les deux bouts des blocs ont été travaillés suivant leur largeur afin d'obtenir des entures horizontales. La configuration des entures de type sans épaulement a été utilisée étant donné sa bonne performance mécanique (Bustos *et al.* 2001 et Bustos *et al.* 2003). Une avance par couteau de 0,84 mm (0,034 pouce) a été obtenue par l'ajustement de la machine à 18,30 m/min (60 pieds/min) de vitesse d'avance et 3500 tr/min de vitesse de rotation des outils et l'emploi de 6 ensembles de couteaux par porte-outil. Les dimensions des entures furent de 28,3 mm de longueur, 0,76 mm de largeur au bout des entures et 6,69 mm de pas (Figure 3.2). Après l'usinage des entures, les blocs ont été collés en suivant les recommandations fournies par le fabricant de l'adhésif. L'adhésif est un système à deux composantes, soit un prepolympère polyuréthane ISOSET UX-100 mélangé avec un polymère en émulsion ISOSET WD3-A322. L'adhésif fut mélangé tout juste avant d'être utilisé et appliqué sur l'une des faces des blocs à un taux de

distribution de 110 g/m<sup>2</sup>. Le pressage a ensuite eu lieu à 20°C durant environ 20 secondes à une pression constante de 3,75 MPa. Les pièces assemblées ont été éboutées à 2,44 m de longueur afin d'obtenir les échantillons pour les essais de traction. Les échantillons ont été entreposés durant vingt-quatre heures dans la chambre de conditionnement à 20°C et 65% HR, avant d'être testés mécaniquement à la température de la pièce.

Les essais de traction longitudinale ont été réalisés selon la norme ASTM D-198 (American Society for Testing and Materials 1997a) à l'aide d'une machine Metriguard, modèle 412. La contrainte à la rupture en traction fut comparée à celle requise pour une utilisation structurale d'après la norme SPS-1 2000 (National Lumber Grades Authority 2000a). Les essais mécaniques et l'acquisition de données ont été contrôlés avec un logiciel développé par Forintek Canada Corp. Les modes de rupture autour des joints ont été examinés et classifiés selon la norme ASTM D-4688 (American Society for Testing and Materials 1997b). Après les essais mécaniques, deux échantillons ont été coupés de chaque côté du joint récemment cassé pour la détermination de la teneur en humidité et de la masse volumique selon la norme ASTM D 2395-93 (American Society for Testing and Materials 1995). La masse volumique basale moyenne des échantillons fut estimée à 436 kg/m<sup>3</sup>. Cette estimation fut faite en considérant un retrait volumétrique total de 11,1% et un point de saturation des fibres de 30% H.

Un dispositif factoriel a été appliqué pour évaluer les effets principaux et l'interaction entre deux facteurs: la teneur en humidité et la température du bois (procédure SAS-GLM). Une analyse de variance à deux critères de classification (Two-way ANOVA) a été effectuée pour évaluer les données (SAS Institute 1998). Au besoin, des comparaisons multiples de Fisher ont été effectuées pour déterminer les différences significatives entre les moyennes. L'hypothèse de normalité a été vérifiée par l'utilisation du test Shapiro-Wilk et l'homogénéité de variances par des tests de Levene et Bartlett.

## 2.5 Résultats et discussion

La valeur moyenne et l'écart-type de la contrainte à la rupture en traction (UTS) en fonction de la température et de la teneur en humidité sont consignés au **Tableau 2.1**. La **Figure 2.1** résume les valeurs de UTS en fonction de la température pour les différentes valeurs de teneur en humidité (12%, 17% et 20% H). Les coefficients de variation de l'UTS ont varié de 11,5% à 20,4% pour les diverses conditions d'essai. Cette variabilité ne semble pas avoir été affectée ni par la variation de la température ni par celle la teneur en humidité du bois. L'ANOVA sur la contrainte à la rupture en traction longitudinale a montré une interaction significative entre la teneur en humidité et la température du bois. Les comparaisons multiples ont indiqué qu'il y a eu des différences significatives sur l'UTS entre les températures du bois pour chaque condition de teneur en humidité (**Tableau 2.1**). Les résultats ont révélé qu'à 12% H, la résistance en traction la plus élevée (34,17 MPa) a été atteinte à 20°C ce qui représente 44% de plus que la valeur la plus basse obtenue à -5°C (23,67 MPa). À 20% H, la plus faible UTS a été obtenue à -5°C encore. La tendance générale que l'on observe est donc que la température du bois au moment de collage affecte la performance mécanique du bois abouté d'épinette noire. Cette influence se manifeste principalement lorsqu'on passe de -5°C à des températures au-dessus de 5°C. Ainsi, pour des températures du bois au-dessus de 5°C, l'UTS a été en moyenne de 32,6 (MPa) à 12% H et de 29,8 (MPa) à 20% H. Ces contraintes ont alors été de 38% et 20% plus élevées respectivement, que les contraintes obtenues lorsque le bois a été collé à -5°C. L'effet de la température peut être expliqué par les différents taux d'évaporation et de diffusion de l'eau suivant l'application de l'adhésif. En effet, lorsque la température est très basse, l'évaporation et la diffusion sont plus lents, ce qui a pour effet de diminuer le taux de polymérisation (River *et al.* 1991, Marra 1992). Le bois conditionné à 17% H a montré des résultats similaires à ceux observés à 12% et 20%. Les résultats ont suggéré que l'effet de la température sur l'UTS entre 5°C et 20°C semble être assez faible. Ceci s'applique à toutes les teneurs en humidité étudiées.

La **Figure 2.2** montre la contrainte à la rupture en traction longitudinale (UTS) obtenue lorsque la température avant usinage et collage était de -5°C, 5°C, 12°C et 20°C. Les

Tableau 2.1. Valeur moyenne de la contrainte à la rupture en traction (MPa) du bois d'épinette noire abouté à quatre températures et trois teneurs en humidité du bois<sup>a</sup>

Teneur en humidité (%)	Température (°C)				SPS 1 2000
	-5	5	12	20	
12	23,67 (3,92) <sup>b</sup> Aa <sup>c</sup>	33,32 (5,53) Ba	30,32 (6,20) Ba	34,17 (5,62) Ba	
17	-	27,70 (3,39) Aa	-	29,04 (3,35) Ab	6,8
20	24,91 (3,35) Aa	30,82 (5,15) Ba	30,98 (4,65) Ba	27,47 (3,45) ABb	

a. Le nombre de répétitions varie de 6 à 16.

b. Les chiffres entre parenthèses correspondent à l'écart-type.

c. Les moyennes à l'intérieur d'une colonne ou d'une ligne, suivie d'une même lettre, ne sont pas statistiquement différentes au seuil de 5% de niveau de probabilité. Les lettres en majuscules sont utilisées pour la comparaison entre températures (ligne) et les lettres en minuscules correspondent à la comparaison entre teneurs en humidité (colonne), et cela pour chaque teneur d'humidité et température considérées séparément.

points obtenus, couvrent les teneurs en humidité qui vont de 12% H à 20% H. L'ANOVA a indiqué que la teneur en humidité a affecté la performance du bois d'épinette noire abouté seulement à 20°C. Aucun effet significatif de la teneur en humidité a été rencontré à -5°C, 5°C et 12°C. Les résultats suggèrent que le nombre de répétitions (variant de 6 à 16) n'a probablement pas été suffisant pour détecter des différences significatives. La technique de jumelage de groupes d'éprouvettes devrait être mieux contrôlée afin de réduire la variation due à d'autres paramètres. À 20°C, l'UTS du bois abouté testé à 12% H a été de 18% ou 24% plus élevée que les pièces collées à 17% H ou 20% H, respectivement. Le nombre de répétitions à cette condition d'essai (16), était plus élevé que les deux autres conditions, ce qui rend donc ce résultat plus fiable. Ce résultat concorde également avec ceux rapportés par Green et Kretschmann (1994) et Kretschmann et Green (1996) indiquant que l'UTS du bois massif diminue à mesure que la teneur en humidité augmente. Par ailleurs, ce résultat est aussi en accord à ce que Steiner (1986) et Ashland (1999) recommandent. Lorsque l'adhésif ISOSET UX100 est combiné avec ISOSET WD 3-A322, l'eau de cette composante réagit avec le polymère isocyanate ISOSET UX-100 pour initier le procédé de durcissement de l'adhésif. C'est pourquoi la compagnie des adhésifs Ashland recommande que la teneur en humidité du bois soit entre 6% et 16% H mais qu'elle soit de préférence située

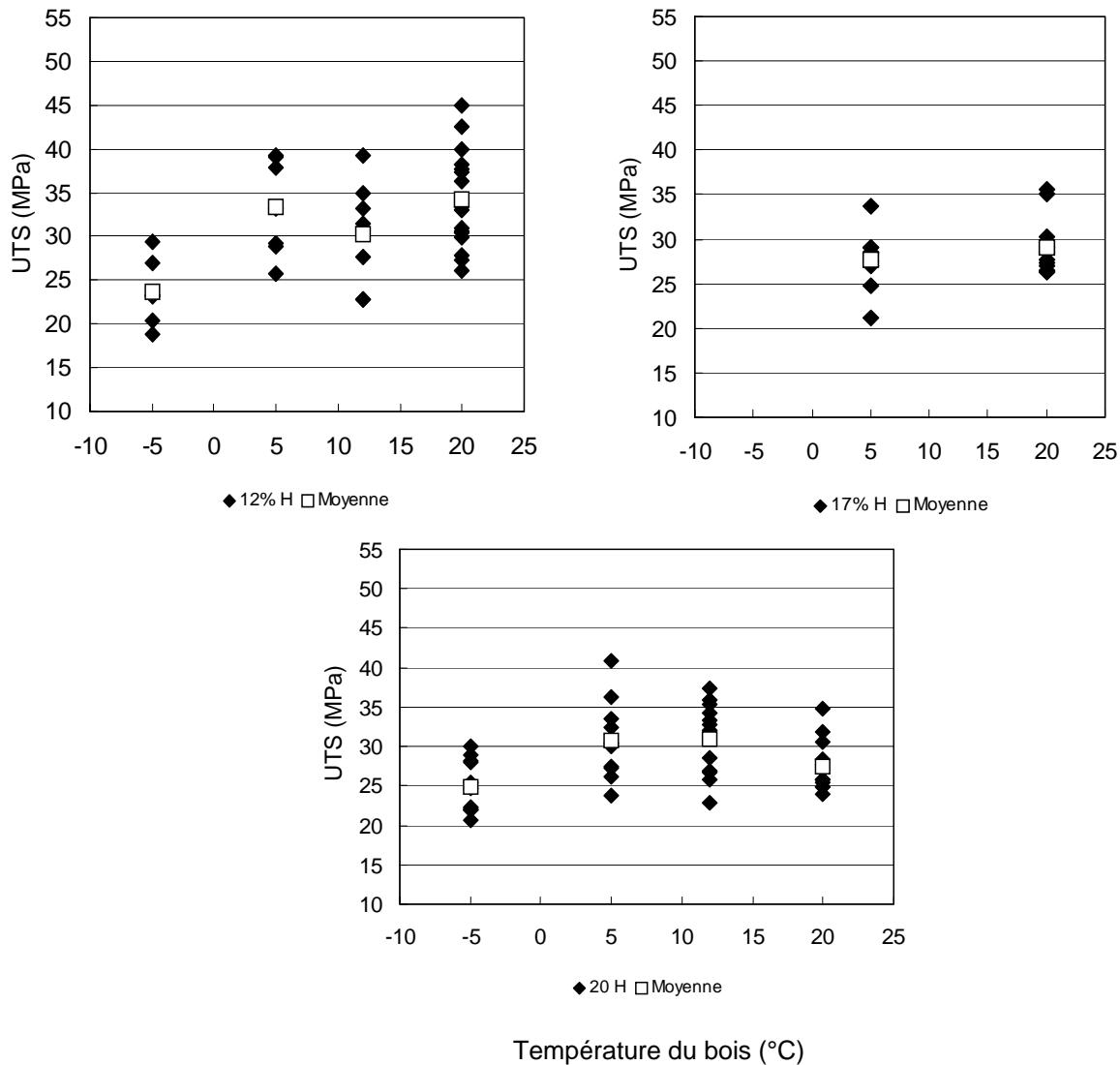


Figure 2. 1. Influence de la température avant usinage et collage sur la contrainte à la rupture en traction longitudinale du bois d'épinette noire abouté à trois conditions de teneurs en humidité.

entre 8% et 12% H (Ashland 1999). Steiner (1986) suggère également que l'étendue idéale pour coller le bois avec des adhésifs de type isocyanate se situe entre 8% et 12% H.

La qualité de la ligne de colle a été évaluée par la proportion de rupture dans le bois d'après la norme ASTM D4688 (American Society for Testing and Materials 1997b). Généralement, la proportion de rupture dans le bois était très élevée. Plus de 80% des

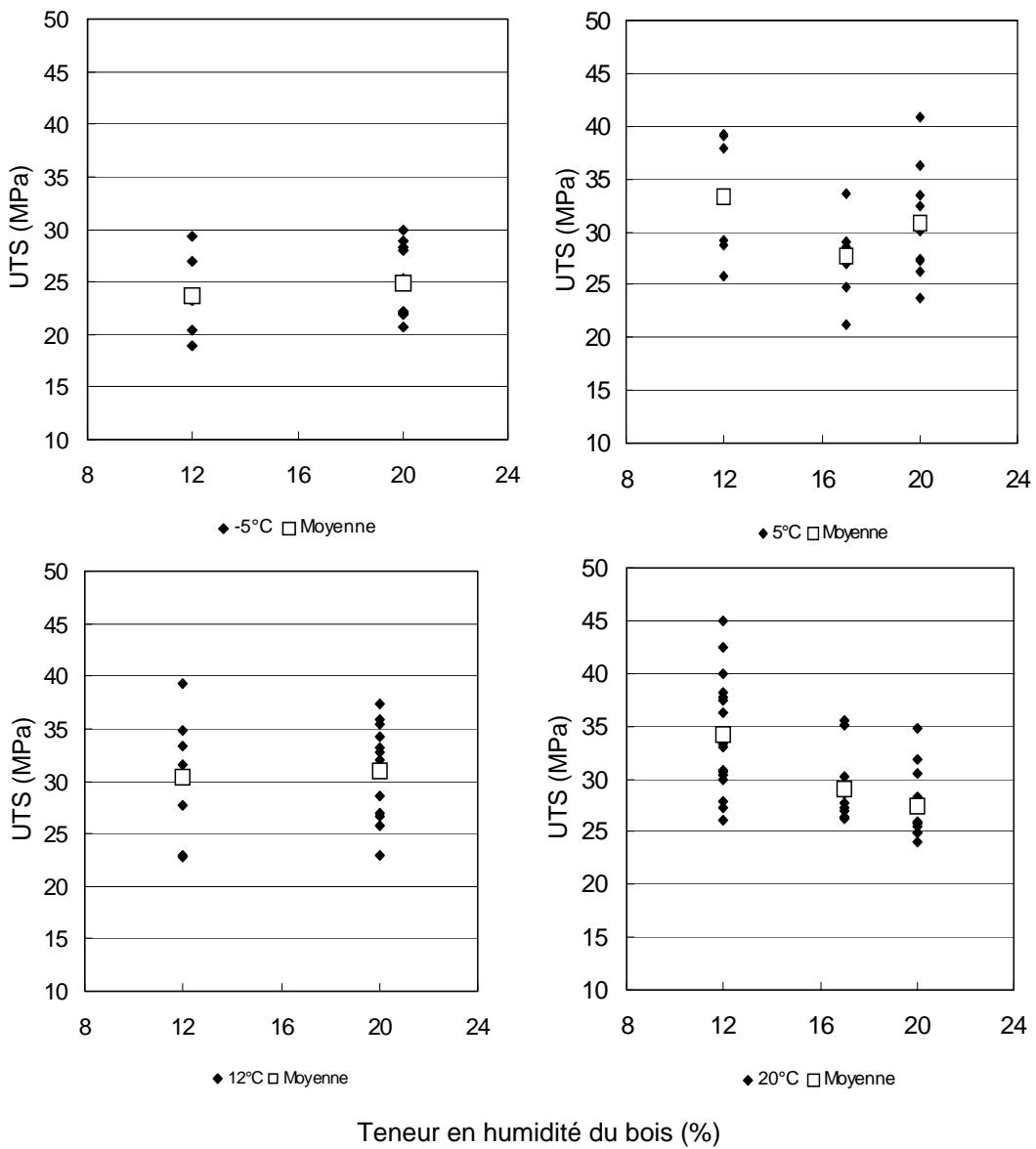


Figure 2.2. Influence de la teneur en humidité avant usinage et collage sur la contrainte à la rupture en traction longitudinale du bois d'épinette noire abouté à quatre conditions de température.

échantillons ont eu une rupture de type 3 et 4. La rupture de type 3 est produite d'une part tout au long du profil avec quelques bris à la racine des entures. La rupture de type 4 se présente d'autre part dans la racine des entures, principalement avec un pourcentage élevé de rupture dans le bois. Il n'y a pas eu de rupture provoquée par un mauvais collage, ce qui

confirme que le procédé d'application et de durcissement de l'adhésif a été relativement adéquat.

## 2.6 Conclusions

Les conditions de température et de teneur en humidité au moment de l'usinage et du collage affectent la performance mécanique du bois abouté d'épinette noire. Le bois abouté et collé à une température de -5°C a montré la plus basse résistance à la rupture en traction longitudinale. Le comportement mécanique des joints collés à des températures de 5°C, 12°C et 20°C fut semblable. L'effet de la teneur en humidité sur l'aboutage à entures multiples du bois d'épinette noire s'est avéré peu concluant. Ainsi, une augmentation significative de l'UTS a été observée à mesure que H diminue de 20% à 12%. Cependant, ce comportement ne fut observé qu'à une seule température (20°C) parmi les quatre étudiées. Une étude approfondie utilisant notamment des techniques de réduction de la variance, ou alors avec un plus grand nombre d'échantillons de façon à réduire l'erreur standard, mérite donc d'être réalisée. Finalement, les résultats mécaniques obtenus sous les différentes conditions de température du bois et de teneur en humidité ont tout de même dépassé les exigences de la norme NLGA SPS-1 (National Lumber Grades Authority 2000a) pour la qualité N° 2 et Meilleur. La grande performance du bois abouté à des conditions diverses de teneurs en humidité et de température est une indication de la bonne qualité de collage avec l'adhésif du type isocyanate.

## 2.7 Références citées

1. American Society for Testing and Materials. 1997a. Standard test methods of static tests of lumber in structural sizes. ASTM D 198-99. ASTM, Philadelphia, PA. EU. pp. 57-75.
2. American Society for Testing and Materials. 1997b. Standard test methods for evaluating adhesives for finger jointing lumber. ASTM D 4688. ASTM, Philadelphia, PA. EU. pp. 373-379.

3. American Society for Testing and Materials. 1995. Standard test methods for specific gravity of wood and wood-base materials. ASTM D 2395-93. ASTM, Philadelphia, PA. EU. pp. 348-355.
4. Ashland. 1999. Infotech<sup>TM</sup>. Fiche technique. Isoset polyurethane, emulsion polymer adhesives for structural wood application. Ashland specialty chemical company. Specialty polymers and adhesives division. Columbus, OH. EU. 3 pp.
5. Bustos, C., R. Beauregard, M. Mohammad et R.E. Hernández. 2001. Effect of joint geometry on the performance of structural finger-jointed black spruce wood. Actes du colloque international RILEM sur des joints en structures du bois, PRO 22. Edité par S. Aicher et H.-W.Reinhardt. Stuttgart. All. pp. 503-512.
6. Bustos, C., R. Beauregard, M. Mohammad, et R.E. Hernández. 2003. Structural performance of finger-joined black spruce wood lumber with different joint configurations. Forest Prod. J. (sous presse).
7. Gerhards, C.C. 1982. Effect of moisture content and temperature on the mechanical properties of wood: An analysis of immediate effects. Wood Fiber Sci. 14(1):4-36.
8. Green, D.W. et D.E. Kretschmann. 1994. Moisture content and the properties of clear Southern pine. Res. Pap. FPL-RP-531. USDA Forest Serv., Prod. Lab., Madison, WI. EU. 28 pp.
9. Green, D.W., S.M. Cramer, B. Suryoatmono et D.E. Kretschmann. 2003a. On fracture-related causes for reduction in tensile strength of Southern Pine lumber at low moisture content. Wood Fiber Sci. 35(1):90-101.
10. Green, D.W., J.W. Evans. 2003b. Effect of low relative humidity on properties of structural lumber products. Wood Fiber Sci. 35(2):247-265.
11. Green, D.W. et J.W. Evans. 2001. Evolution of standardized procedures for adjusting lumber properties for change in moisture content. Gen. Rapport Technique. FPL-GTR-127. USDA Forest Serv., Forest Prod. Lab., Madison, WI. EU. 50 pp.  
[\(http://www.fpl.fs.fed.us/documents/FPLGTR/fplgtr127.pdf\)](http://www.fpl.fs.fed.us/documents/FPLGTR/fplgtr127.pdf)
12. Kretschmann, D.E. et D.W. Green. 1996. Moisture content-specific gravity relationships for clear Southern pine. Dans: Proceedings of the international wood

- engineering conference. Édité par Gopu, Vijaya K.A. 28-31 Octobre 1996. Nouevelle-Orléans, LA. EU. Vol.2. pp. 536-542.
13. Marra, A.A. 1992. Technology of wood bonding, principles in practice. Van Nostrand Reinhold, New York, NY. EU. 454 pp.
  14. Ngangué, Y. 2000. Drying engineered wood products and their components: Impact of moisture content on the performance of fingerjointing. Forintek Canada Corp. rapport interne, CFS-VA rapport # 2419. Québec, QC. Canada. 57 pp.
  15. National Lumber Grades Authority. 2000a. Special products standard for fingerjoined structural lumber. NLGA-SPS 1. Vancouver, BC. Canada. 25 pp.
  16. National Lumber Grades Authority. 2000b. Standard grading rules for Canadian lumber. National Lumber Grades Authority. NLGA. Vancouver, BC. Canada. 238 pp.
  17. River, B.H., C.B. Vick et R.H. Gillespie. 1991. Wood as an adherend. In: Treatise on Adhesion and adhesives. Édité par J. Dean Minford. Marcel Dekker. New York, NY. EU. pp 1-230.
  18. SAS Institute. 1998. SAS/Stat users guide, release 6.03 Ed. SAS Institute, Inc., Cary, NC. EU.
  19. Shuler, C.E., D.A. Grant et R.C Moody. 1979. Evaluation of glued laminated beams of Eastern spruce and eastern Hemlock. Forest Prod. J. 29(7):23-28.
  20. Shuler, C.E. 1980. Response of Eastern spruce fingerjoints to variation in assembly time and moisture content. Wood Fiber. 12(4):227-232.
  21. Steiner, P.R. 1986. Bonding wood composites with isocyanates. Canadian Forestry Service, cat. No. Fo 42-91/5-1986E. Edmonton, Al. Canada.
  22. Strickler, M.D. 1970. End gluing of green lumber. Forest Prod. J. 20(9):47-51.
  23. Suomi-Lindberg, L., P. Pulkkinen et R. Nussbaum. 2002. Wood Adhesion and Glued Products. State of the Art – Report. COST Action E13. Chapitre 5: Influence of wood component on the bonding process and the properties of wood products. Working Group 1: Wood Adhesives. Édité par Manfred Dunky, Tony Pizzi et Marc Van Leemput. 1<sup>ère</sup> Édition-Février 2002. Bruxelles, Belgique. pp. 118-140.

24. Verreault, C. 1999. Performance evaluation of green gluing for finger jointing. Forintek Canada Corp. Rapport interne. CFS-VA report # 2295. Ste-Foy, QC. Canada. 59 pp.
25. Verreault, C. 2000. Assessment of two green gluing processes for finger jointing. Forintek Canada Corp. Rapport interne. CFS- VA rapport # 2407. Ste-Foy, QC. Canada. 137 pp.

## **Chapitre III**

# **Structural performance of finger-joined black spruce lumber with different joint configurations**

**Cecilia Bustos**

**Robert Beauregard**

**Mohammad Mohammad**

**Roger E. Hernández**

---

The authors are, respectively, Ph.D. Student and Assistant Professor, Dept. of Wood and Forest Sciences, Laval University, Quebec, QC, Canada, G1K 7P4, Research Scientist, Forintek Canada Corp., Quebec, Canada G1P 4R4, and Professor, Dept. of Wood and Forest Sciences, Laval University, Quebec, QC, Canada, G1K 7P4. The authors wish to thank the technicians from the Dept. of Wood and Forest Sciences at Laval University as well as those from the Value Added Products and Building Systems Departments at Forintek Canada Corp. for their technical support. Acknowledgment is also made for financial support to the Canadian Forest Service, and the Bío-Bío University, Concepción, Chile, as well as Ashland Adhesives, for their valuable support.

---

### 3.1 Résumé

---

Dans l'est du Canada, le bois d'épinette noire (*Picea mariana* (Mill.) B.S.P.) est souvent utilisé pour la fabrication des produits de bois d'ingénierie. Cependant, Il y a peu d'information disponible sur l'effet de la forme et géométrie des joints à entures multiples sur la performance structurale de cette espèce. L'objectif de cette étude fut donc d'évaluer la performance du bois d'épinette noire abouté avec trois types de formes: sans épaulement, mâle-femelle et inversée. Un adhésif de type isocyanate a été utilisé pour les essais. Les trois types de formes de joints ont eu un très bon comportement et les valeurs de résistance ont dépassé celles requises par la norme canadienne. La résistance à la flexion fut significativement différente entre les trois types de joints. Une tendance similaire a été observée lors des essais en traction, bien que les différences ne furent pas statistiquement significatives. L'analyse a indiqué que les joints sans épaulement se comportent mieux que les joints mâle-femelle et les joints inversées et cela notamment pour les joints de type horizontal. En traction et en flexion, les ruptures du bois ont été produites dans le joint avec quelques ruptures à la racine des entures, ce qui indique une très bonne performance de la ligne de colle.

### 3.2 Abstract

---

In Eastern Canada, black spruce (*Picea mariana* (Mill.) B.S.P.) is used for producing engineered wood products. However, little information is available on the influence of finger-joint configuration on the structural performance of this species. The purpose of this work was to evaluate the behavior of finger-jointed black spruce for three joint configurations: feather, male-female and reverse. Isocyanate adhesive was used for all types of joints studied. All of the three joint configurations performed well and strength values were found to meet the Canadian standard requirements. Significant differences were found for bending strength between the three joint profiles. The same trend was observed for tension strength but differences were not statistically significant. The analysis indicated that the feather configuration performs better than male-female and reverse profiles, especially for horizontal structural joints. In tension and bending tests, wood

failure was mostly produced along the joint profile but with some failure at the finger roots indicating an excellent performance of the gluelines.

---

Engineered Wood Products (EWP) industry plays an important role in the Canadian economy. In Quebec, companies dedicated to the manufacture of EWP work mainly with spruce, pine and balsam fir (S-P-F) or trembling aspen. Among these, the species of choice is black spruce, (*Picea mariana* (Mill.) B.S.P), which shows high density and mechanical strength for structural applications.

The engineered wood approach aims at developing products from glued-up or assembled elements such as laminated beams, I and open-web joists, Laminated Veneer Lumber, etc (Lamy 1995). These products require more engineering, design, knowledge and quality control than conventional ones. In Quebec, structural joined wood is mainly sold as a component of EWP, such as I-joist, which is made from joined wood in top and bottom flanges with a web of OSB or plywood. Given that joined wood in structural components must resist high stresses, the mechanical strength is one of the principal performance requirements.

To use wood more efficiently in the development of structural finger-jointed products, specific process parameters must be taken into account. The type of finger-joints, the moisture content and temperature conditions of joined wood members, as well as the machining process require to be controlled and optimized. Many wood-related factors are also known to affect the strength of finger-joints, such as species, density, natural defects, while others are related to the gluing process.

The type of adhesive, curing time and the pressure of application have a great influence on the strength behavior of the assemblies. Isocyanate-based adhesives such as polyurethane (PUR) are gaining acceptance in North America for a variety of structural and non-structural applications. Joined wood is an application of interest for PUR adhesives which is why they are being tested thoroughly recently. PUR adhesives provide interesting

characteristics. They produce a high-strength bond and cure at ambient conditions even though this curing can be accelerated by hot pressing or RF treatments. The bonds obtained are resistant to creep, to moisture and to heat exposure treatments (Pagel and Luckman 1984a, Pagel and Luckman 1984b). For these reasons, it is reasonable to think that the PUR adhesives is a viable alternative for wood finger-jointing applications (Chen 2001, Lange *et al.* 2001, Verreault 1999).

Another important aspect of the finger-jointing process is the wood machining, which is usually performed following recommendations given by tool and machine manufacturers. Poor finger-joints will be obtained when using inadequate machining conditions (ACEco Precision Wood Tooling 2000), where for example, the tear-out is a common defect that can be caused by either worn knives, high feed speeds or wrong rake angle.

It is known that the finger geometry has an effect on the performance of structural joints. Parameters such as the tip width, pitch width, finger length and slope are interrelated and can influence positively or negatively the performance of the joint. However, little information is available on the finger-jointing performance of black spruce wood. Jokerst (1980) indicated that the geometry of the joint is the most important aspect for a good finger-jointing performance. Considerable work related to the influence of geometrical joint parameters has been made on several species (Ayarkwa *et al.* 2000, Biblis and Carino 1993, Richards 1963, Selbo 1963, Madsen and Littleford 1962). According to Jokerst (1981) and Selbo (1963) certain geometrical parameters are particularly important for the strength of finger-joints. For instance, the strength increases with a larger finger length/pitch width ratio and a lesser finger tip width. Selbo (1975) showed that the tensile strength of various types of end joints depended on the geometry of the assembled parts. Thus, the use of scarf and finger-joints of sufficiently low slope can yield 85% to 90% of strength of solid wood. As a result, structural finger-joints have relatively longer fingers with thin tips compared to non-structural joints and they are used when joint strength is the primary concern.

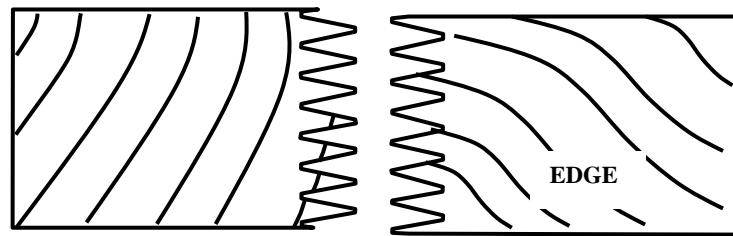
Several structural configurations of finger-joints are used to join wood: feather, male-female and reverse (**Fig. 3.1**). The three joint types show basically the same geometry parameters except for the shouldering. Reverse profile presents alternating shoulders on each board side and is the most common joint. The male-female is a less common joint and it is supposed to be used in cases where the finger-jointed will be molded or shaped on both sides. Feather joint is used when stock dimension varies significantly (Wisconsin Knife Works 2000). During visits to five finger-jointing plants in Quebec, it was observed that two mills have working with the male-female joint profile, two others with reverse and one with a feather profile. No agreement existed among these mills on which of these types of geometry produce the best mechanical performance.

Therefore, the purpose of this work is to compare the structural performance of finger-jointed black spruce wood processed with three types of joint configurations. This study is an initial step towards a comprehensive understanding of the black spruce finger-jointing process which will assist the Eastern Canadian wood products industry for optimizing its finger-jointing operations.

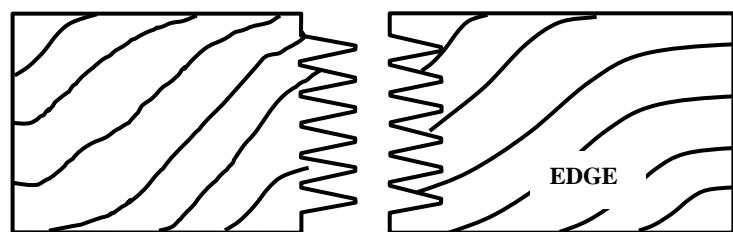
### **3.3 Materials and methods**

Experiments were carried out with 38 mm by 64 mm (2- by 3- inch), kiln-dried planed black spruce studs coming from the Chibougamau region in the Quebec province. The studs were placed in a conditioning room at 20°C and 65 percent relative humidity to reach a nominal equilibrium moisture content (EMC) of 11.2%. Defects were removed from pieces by cross-cutting to produce blocks varying in length between 20 and 91 cm, of N° 2 grade and better quality grades (National Lumber Grades Authority 2000 a). The test process was based on the Canadian National Grades Lumber Authority NLGA-SPS 1-2000 specifications for structural jointed wood (National Lumber Grades Authority 2000 b).

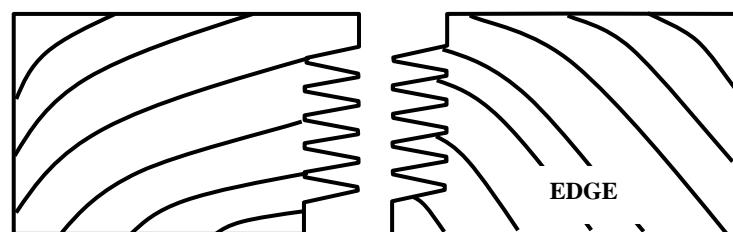
A Conception RP 2000 machine provided with a lateral feed system, common in the North American finger-jointing industry, was used. The ends of blocks were machined across the width in order to obtain horizontal finger-joints. Three types of joint geometry



(A)



(B)



(C)

Figure 3. 1. a) Side view of the types of structural joints used in Eastern Canadian mills:  
(A) feather, (B) male-female, and (C) reverse.

were studied: feather, male-female, and reverse (**Fig. 3.1**). A chip-load of 0.84 mm (0.033 inch) was obtained by setting the machine at 18.3 m/min (60 feet/min) feed speed, and 3500 rpm rotation speed with 6 knife sets (bolts) per tool. The finger-joint geometry was 28.27 mm (1.113 inch) finger length, 0.76 mm (0.030 inch) tip width, and 6.69 mm (0.263 inch) pitch width (**Fig. 3.2**). After finger-jointing, the blocks were glued with an adhesive formulation according to the technical recommendations supplied by the adhesive manufacturer. The adhesive was an ISOSET UX-100/A322 isocyanate combined with a crosslinking agent containing a polymeric isocyanate. A one-face glueline application was used at a spread rate of 110 g/m<sup>2</sup>. The assembled joints were pressed at 20°C under a constant end pressure of 3.79 MPa (550 psi) during 20 seconds. Thus, given the variable length of blocks, each of the pieces was composed by a variable number of joints. After the curing period, the pieces were automatically cross-cut at 3.05 m or 2.44 m long to obtain the specimens for bending and tension tests respectively. The specimens were mechanically tested after twenty-four hours of curing at room temperature conditions.

The mechanical bending properties of the finger-joined specimens were evaluated according to the SPS 1-2000 standard (National Lumber Grades Authority 2000 b). Four-point edge- and flat-wise bending tests were performed with a Metriguard machine, model 312, over 1270 and 813 mm of total span, respectively. Load rate was set in order to reach the maximum load in about 2 minutes. Testing and data acquisition were controlled with a MTS Systems Corporation's TestWorks™ data logging system (MTS Systems Corp. 1999). The modulus of rupture in bending (MOR) was calculated. Failure mode was examined around the joints and near the loading points.

Tension tests were performed according to ASTM D-198 standard (American Society for Testing and Materials 1997 a) with a Metriguard testing machine, model 412. Testing and data acquisition were controlled with a software developed by Forintek Canada Corp. The ultimate tensile strength (UTS) was calculated. Failure modes were examined around the joints and were classified according to the ASTM D-4688 standard (American Society for Testing and Materials 1997 b).

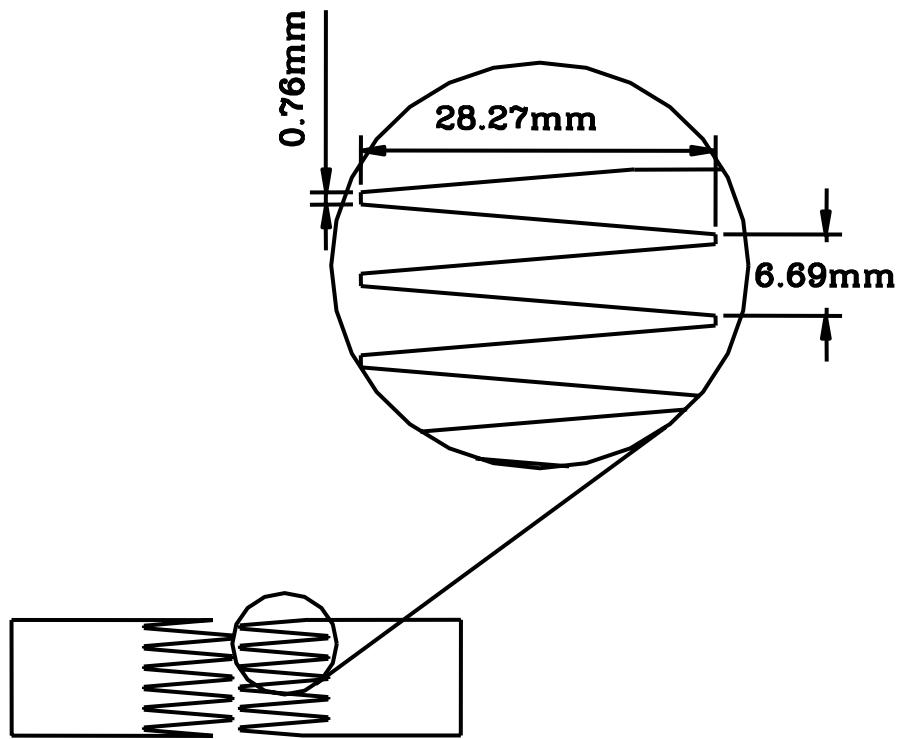


Figure 3. 2. Dimension of the joint for three profiles of finger-joints used in this study.

After mechanical tests, two samples were cut from each side of the failed joint, and moisture content and density were determined following ASTM D 2395-93 standard (American Society for Testing and Materials 1995). The mean basic density of specimens was estimated at  $450 \text{ kg/m}^3$ . Since specimens at the testing time were at 11.2% MC, their volume at the green state was adjusted considering a total volumetric shrinkage of 11.1% and a fiber saturation point of 30%.

The experiment in bending test was a factorial design with two factors: mode of bending (edge-and flat-wise) and type of profile (feather, male-female and reverse). A two-way analysis of variance (ANOVA) from SAS (GLM procedure) was performed to evaluate the data (SAS Institute 1998). Furthermore, an one-way ANOVA with this same

software was performed to evaluate the tension data (SAS Institute 1998). When a source of variation was significant, multiple comparison tests with Bonferroni corrections were carried out to determine which factor levels differed from the others. These comparisons were done at the comparison-wise error rate of  $0.05/c$ , where  $c$  is the total number of comparisons. The normality assumption for both bending and tension tests was verified using the Shapiro-Wilk test while the homogeneity of variances was analysed by Levene and Bartlett tests.

### 3.4 Results and discussion

A summary of MOR values in edge- and flat-wise bending of finger-joined black spruce wood is given in **Table 3.1**. A comparison between the minimum and mean values of MOR for the three different types of finger-joints is shown in **Figure 3.3**.

For edge- and flat-wise bending, an ANOVA indicated that a statistically significant difference in MOR existed among the three finger-joint configurations. The MOR edge-wise was 7% and 14% lower for male-female and reverse profiles respectively, compared to that obtained by the feather configuration. However, the differences were statistically significant only between reverse and feather profiles (**Table 3.1**). In flat-wise bending, the MOR was 17% and 37% lower for male-female and reverse configurations, respectively, in relation to the feather profile. The factorial experiment confirmed that differences in MOR were more significant for flat-wise than for edge-wise bending. This can be explained in terms of differences in the glued area and the edge shoulders observed among the joint configurations. The finger-joints machined with edge shoulders (male-female and reverse) ensure that a straight line across the surface is after final planing. However, this can have a negative impact from a strength or brittle fracture point of view (Bryant *et al.* 1998). Feather configuration had about 7% and 15% more glued area in the joints than the male-female and reverse configurations, respectively. The difference in the glued area comes principally from the shoulder parts of the outside fingers (**Fig. 3.1**). Also, in bending, the maximum tensile stress is developed on the convex side of the sample and the bending strength is controlled by the ultimate fiber stress on the tension side. Thus, in flat-wise bending, it is

Table 3. 1. MOR determined from edge- and flat-wise bending tests for three profiles of finger-joints of black spruce.

Statistical parameter	Feather		Male-female		Reverse		SPS 1-2000	
	Edge	Flat	Edge	Flat	Edge	Flat	Edge	Flat
Mean (MPa)	55.3 <sup>A</sup>	58.7 <sup>a</sup>	52.9 <sup>AB</sup>	48.7 <sup>b</sup>	47.4 <sup>B</sup>	36.7 <sup>c</sup>	34.5	34.5
Std. Dev. (MPa)	8.2	7.4	5.9	8.8	9.4	5.6	-	-
n	12	15	16	15	17	18	-	-

n: Sample size

\* : Means within a row followed by the same letter are not significantly different at the 5 percent probability level. Uppercase letters are for edge-wise bending comparison and lowercase letters are for flat-wise bending comparison.

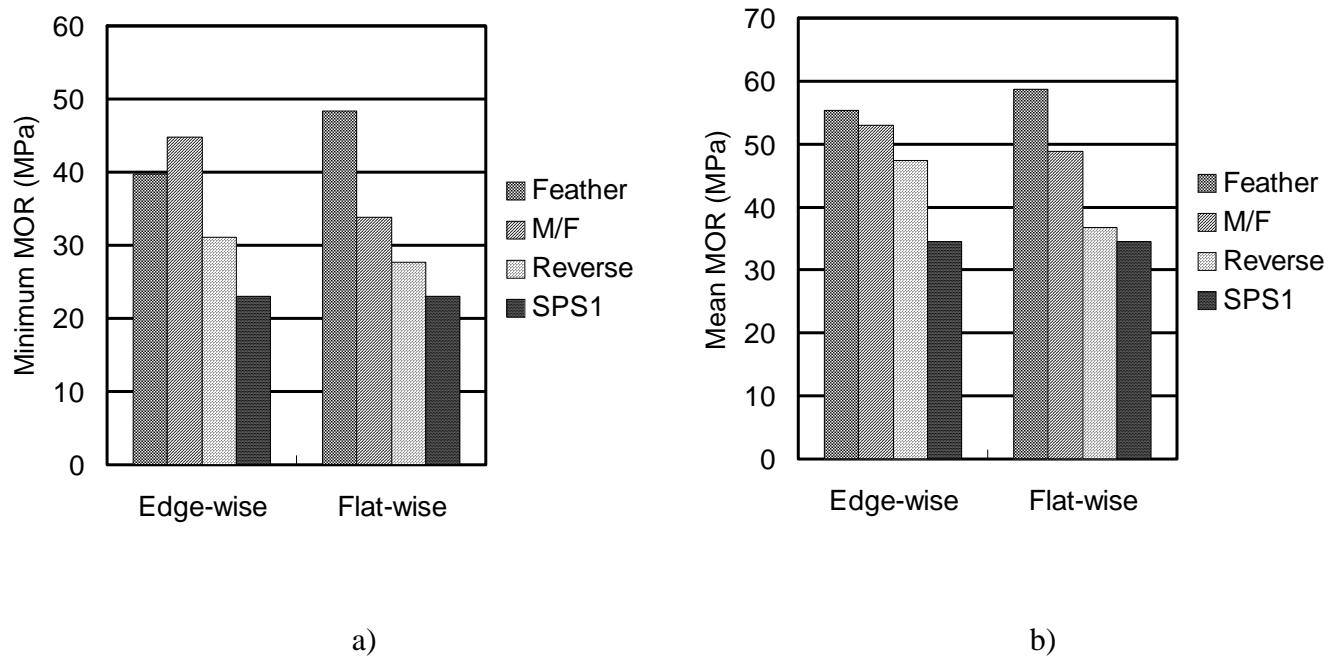


Figure 3. 3. Comparison among MOR values as determined from edge- and flat-wise bending tests for the three profiles of finger-joints of black spruce.  
a) Minimum MOR, b) Mean MOR.

the outside finger that receives the most load and initiates the failure. Its integrity is hence very critical to the performance of the joint.

The male-female and reverse configurations have an edge shoulder that in fact is a butt joint, which is a discontinuity creating a stress concentration area. The feather profile minimize this discontinuity (**Fig. 3.1**). Numerical analyses show that high stress concentrations (stresses along the grain direction) develop in the vicinity of the finger tip/root (Smardzewski 1996, Pellicane 1994). Other studies based on holographic images of deformation patterns in end finger-joints have shown several negative effects of the finger connection on the strength (Hernández 1998, Sandoz *et al.* 1994). Thus, the presence of local stress concentration leads to the initiation of failure at the finger base and, as a consequence, a lower strength is obtained. Since in flat-wise bending the shoulders are resisting the tensile stress developed at the bottom fibers, higher tensile strength can be achieved with feather joints compared to male-female or reverse.

In edge-wise bending, differences in MOR among the three configurations were less evident given that each finger works in an identical way and stresses are, hence, equally distributed across all fingers. However, the lower glued area in reverse configuration affected negatively the mechanical strength in edge-wise bending.

The minimum MOR values obtained for the three types of joints were found to be higher than those required by NLGA-SPS 1-2000 (National Lumber Grades Authority 2000 b) for N° 2 and better grade of the Spruce-Pine-Fir group (**Fig. 3.3**).

The mean ultimate tensile strength (UTS) values for the three types of finger-joints are given in **Table 3.2**. A similar trend to that observed in bending strength for the different configurations of joints can be seen. Feather joint has the highest mean UTS value compared to either male-female or reverse profiles (34 MPa compared to 31 and 30 MPa, respectively). However, The ANOVA showed that these differences were not statistically different, even though the probability level was close to 0.05 ( $P=0.056$ ). The results suggest that the number of repetitions was probably not sufficient to detect any significant differences. Yet, all joint profiles tested exhibited higher minimum tensile strength compared to the SPS-1 standard (National Lumber Grades Authority 2000 b) specified value (**Fig. 3.4**). In fact, the minimum strength of the three types of joints tested is more

Table 3. 2. Ultimate tensile strength (UTS) for the three profiles of finger-joints of black spruce.

Statistical parameter	Feather	Male-female	Reverse	SPS1-2000 Proofload tension stress level
Mean (MPa)	33.5 <sup>A*</sup>	31.1 <sup>A</sup>	29.8 <sup>A</sup>	6.8
Std. Dev. (MPa)	4.4	5.2	2.3	-
N	15	15	15	-

n: Sample size

\* : Means within a row followed by the same letter are not significantly different at the 5 percent probability level.

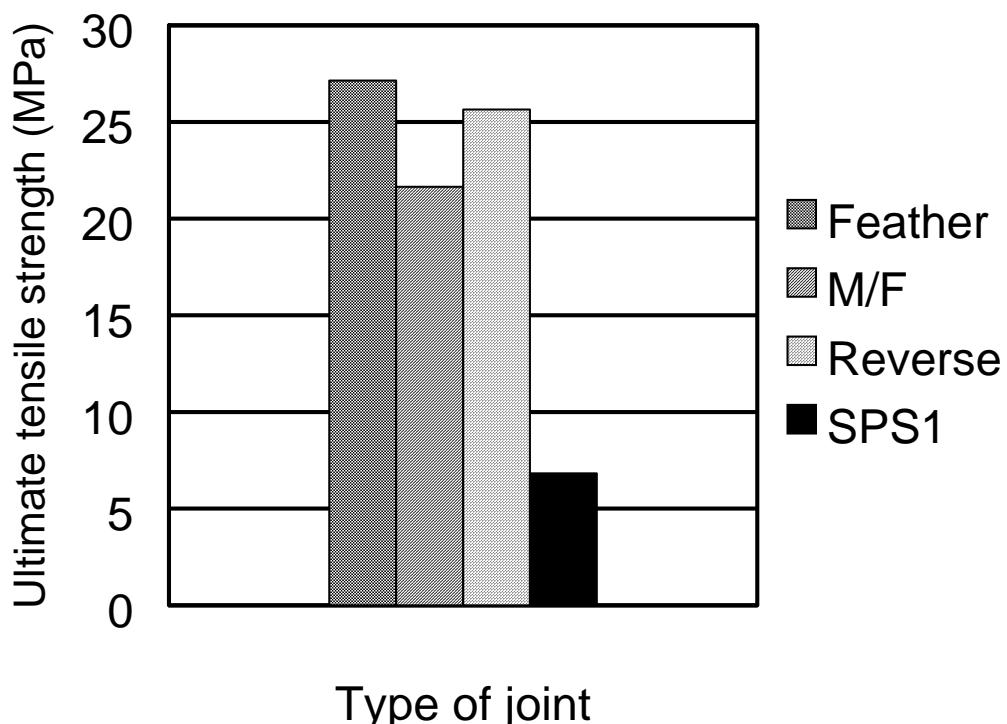


Figure 3. 4. Comparison among minimum UTS values for the three profiles of finger-joints of black spruce and those specified in SPS-1 2000 (National Lumber Grades Authority 2000b).

than 3.6 times the proofload tension stress level specified by the SPS1-2000 (National Lumber Grades Authority 2000 b) (mean value of 24.8 MPa, all joints pooled, compared to 6.8 MPa).

The quality of the glueline was evaluated by the percent wood failure in the finger-joint. The ASTM D4688 (American Society for Testing and Materials 1997 b) used to classify the wood failure in the finger-joint is based only on the tension test. However, observations on joint failures in the bending tests were also recorded. Most specimens in the three groups (male-female, reverse and feather) failed mainly in simple tension characterized by a combination of brash tension failure and splitting of wood fibers. Failure was mostly initiated in the middle of the specimen that is, at the finger-joint location. This failure was more obvious for specimens tested in edge-wise than flat-wise bending. The second most dominant failure mode was in splintering tension. It was observed however, that even though failure initiated at the location of the finger-joint (mid-span), it was predominately in wood and not in the glueline. These results indicate a good quality of bonding.

Failure modes for tension tests were evaluated according to ASTM D4688 (American Society for Testing and Materials 1997 b). Generally, wood failure was high for all types of finger-joints tested. More than 74% of specimens failed in modes number 3 and 4. Failure mode number 3 is mostly along the joint profile but with some failure at the finger roots while mode 4 is associated with tensile wood failure occurring at the joint roots and with high overall wood failure. Such failures are the most common in structural finger-joined material. Almost no glue bond failure was observed, which confirms that the gluing process was appropriate.

Differences in failure modes among the three types of finger-joints studied were most pronounced in bending than in tension. When loading perpendicular to the finger length, a bending test tends to open the fingers, unlike a tension test that tends to shear through the glueline along the wood grain.

### **3.5 Conclusion**

The profile of structural finger-joints had a significant influence on MOR in edge and flat-wise bending but not on the ultimate tensile stress (UTS) of black spruce wood. However, the authors are inclined to think that a greater number of repetitions could possibly produce significant differences in UTS. In all cases, the feather profile exhibited the highest mean strength in both bending and tension strengths. Differences were found to be due to the higher bonded area and non-existent shouldering for this profile when compared to the two others. This type of finger-joint profile is therefore the most efficient among the three profiles tested. However, all types of profiles largely met strength specifications outlined in the Canadian National Lumber Grades Authority SPS 1-2000 for structural lumber. The results have also shown that finger-joints of high flexural and tensile performance can be produced using the type of isocyanate adhesive studied.

### **3.6 Literature cited**

- ACEco Precision Wood Tooling. 2000. Industrial Wood Tooling, catalog and technical manual. Idaho. ID. USA. 61pp.
- American Society for Testing and Materials. 1997 a. Standard test methods of static tests of lumber in structural sizes. ASTM D 198-99. ASTM, Philadelphia, PA. USA. pp. 57-75.
- American Society for Testing and Materials. 1997 b. Standard test methods for evaluating adhesives for finger jointing lumber. ASTM D 4688. ASTM, Philadelphia, PA. USA. pp. 373-379.
- American Society for Testing and Materials. 1995. Standard test methods for specific gravity of wood and wood-base materials. ASTM D 2395-93. ASTM, Philadelphia, PA. USA. pp. 348-355.
- Ayarkwa, J., Y. Hirashima, and Y. Sasaki. 2000. Effect of finger geometry and end pressure on the flexural properties of finger-jointed tropical African hardwoods. Forest Prod. J. 50(11/12):53-63.

- Biblis, E. and H. Carino. 1993. Factors influencing the flexural properties of finger-jointed southern pine LVL. *Forest Prod. J.* 43(1):41-46.
- Bryant, A.H., R. D. Hunt, L. H. Shi, and W.G. Ferguson. 1998. Finger joint geometry for optimum results. *Proceedings 5<sup>th</sup> world conference on timber engineering*. Edited by J. Natterer and J.-L. Sandoz. Polytechnic presses and romandes academics. 17-20 August 1998. Montreux, Switzerland. Vol.2. pp. 198-206.
- Chen, G. 2001. Two-part polyurethane adhesive for structural finger joints. *Industrial applications of isocyanates and polyurethanes. The wood adhesives 2000 symposium. Section 2 A : Industrial applications of isocyanates and polyurethanes*. Edited by Forest Products Society. South Lake Tahoe. CA. USA.22-23 June 2000. pp.15-16.
- Hernández, R. 1998. Analysis of strain in finger-jointed lumber. *Proceedings 5<sup>th</sup> world conference on timber engineering*. Edited by J. Natterer and J.-L. Sandoz. 17-20 August 1998. Montreux, Switzerland. Vol.1. pp. 145-162.
- Jokerst, R.W. 1981. Finger-jointed wood products. *Res. Pap. FLP 382. USDA Forest Serv., Prod. Lab., Madison, WI. USA.* 23 pp.
- Jokerst, R.W. 1980. The effect of geometry on the performance of structural finger-joints. *Proceedings of Production, Marketing and use of Finger-jointed Sawnwood*. C.F.L. Prins, ed. Timber Committee of the United Nations Economic Commission for Europe. Martinus Nijhof/Dr. W. Junk Publishers. The Hague, Netherlands. pp.169-180.
- Lamy, C. 1995. Survey on the engineering wood products in the North-American and Quebec context. Ministry of the Natural Resources of Quebec. Direction of the wood forest products industry development. Quebec, QC. Canada. 53 pp. (in French).
- Lange D., J.T. Fields, and S.A. Stirn. 2001. Fingerjoint application potentials for one-part polyurethanes. *Proceedings: The wood adhesives 2000 symposium. Section 2A: Industrial applications of isocyanates and polyurethanes*. Edited by Forest Products Society. South Lake Tahoe, CA. USA.22-23 June 2000. pp.17-18.

- Madsen, B. and T.W. Littleford. 1962. Finger joints for structural usage. Forest Prod. J. 12(2):68-73.
- MTS Systems Corporation. 1999. TestWorks R4, Version 4.03, Eden Prairie, MN. USA.
- National Lumber Grades Authority. 2000 a. Standard grading rules for Canadian lumber. National Lumber Grades Authority. NLGA. Vancouver, BC. Canada. 238 pp.
- National Lumber Grades Authority. 2000 b. Special products standard for fingerjoined structural lumber. NLGA-SPS 1. Vancouver, BC. Canada. 25 pp.
- Pagel, H. F. and E.R. Luckman. 1984a. EPI-a new structural adhesive. Adhesives for wood. Research applications, and needs. Edited by Robert H. Gillespie. USDA Forest Serv., Forest Prod. Lab., Madison, WI. USA. pp. 139-149.
- Pagel, H. F. et E.R. Luckman. 1984b. A new isocyanate containing wood adhesive. IN: Wood Adhesives: Present and future. Journal of Applied Polymer Science. Applied polymer Symposium 40. Edited by A. Pizzi. John Wiley and Sons. pp. 191-202.
- Pellicane, P. J. 1994. Finite element analysis of finger-joints in lumber with dissimilar laminate stiffnesses. Forest Prod. J. 44(3):17-22.
- Richards, D. B. 1963. Improved tips for finger joints. Forest Prod. J. 13(6):250-251.
- Sandoz, J., P. Rastogi, and M. Walgenwitz. 1994. Grading and reliability of glued laminated timber. Proceedings of Pacific Timber engineering conference. Published by the Timber Research and Development Advisory council. July 11-15. Gold Coast, Australia. (1):663-670.
- SAS Institute. 1998. SAS/Stat users guide, release 6.03 Ed. SAS Institute, Inc., Cary, N.C. USA.
- Selbo, M.L. 1975. End and corner joint construction. In: Adhesive bonding of wood. Technical bulletin N°1512. USDA. Forest Serv., Washington, DC. pp. 49-55.
- Selbo, M.L. 1963. Effect of joint geometry on tensile strength of finger joints. Forest Prod. J. 13(9):390-400.
- Smardzewski, J. 1996. Distribution of stresses in finger joints. Wood Sci. Technol. 30(6):477-489.

Verreault, C. 1999. Performance evaluation of green gluing for finger jointing. Forintek Canada Corp. Internal report, CFS-VA report # 2295. Ste-Foy, QC. Canada. 59 pp.

Wisconsin Knife Works, Inc WKW. 2000. Premium Cutting Tools. 07/00 Catalog. Beloit, WI, USA.112 pp.

## **Chapitre IV**

### **Effects of curing time and end-pressure on the tensile strength of finger-joined black spruce lumber**

**Cecilia Bustos**

**Mohammad Mohammad**

**Roger E. Hernández**

**Robert Beauregard**

---

The authors are, respectively, Ph.D. Student, Dept. of Wood and Forest Sciences, Laval University, Quebec, QC, Canada, G1K 7P4, Research Scientist, Forintek Canada Corp., Quebec, QC, Canada G1P 4R4, Professor and Associate Professor, Dept. of Wood and Forest Sciences, Laval University, Quebec, QC, Canada, G1K 7P4. The authors wish to thank the technicians from the Dept. of Wood and Forest Sciences at Laval University as well as those from the Value Added Program and Building Systems Department at Forintek Canada Corp. for their technical support. Acknowledgment is also made to the Canadian Forest Service for their financial support, and to the Bío-Bío University, Concepción, Chile as well as Ashland Adhesives, for their valuable support.

---

## 4.1 Résumé

---

Des échantillons de joints à entures multiples d'épinette noire (*Picea mariana* (Mill.) B.S.P), provenant de l'Est du Canada, ont été préparés afin d'évaluer l'effet du temps de durcissement de l'adhésif et de la pression d'assemblage sur la résistance en traction longitudinale. Un adhésif de type isocyanate, durcit à la température de la pièce, et une configuration de joint de type sans épaulement ont été employés. Les joints à entures multiples ont été usinés à une vitesse d'avance de 18,3 m/min (60 feet/min), à une vitesse de rotation de 3500 tr/min et à 0,86 mm (0,034 pouce) d'avance par couteau. L'adhésif a été appliqué sur l'une des faces des blocs, avec un taux de distribution de 110 g/m<sup>2</sup>. Quatre temps de durcissement (1, 2, 5 et 24 heures) et six pressions d'assemblages s'étendant de 1,38 MPa à 4,82 MPa (200 à 700 psi) appliquées pendant 20 secondes ont été évalués. Les résultats ont montré que le temps de durcissement et la pression d'assemblage ont un effet statistiquement significatif sur la performance mécanique des joints structuraux à entures multiples. Après 5 heures de durcissement, les joints à entures multiples à base d'isocyanate peuvent atteindre plus de 90% de la résistance à la rupture en traction longitudinale de référence, obtenue à 24 heures de temps de durcissement. La meilleure performance mécanique du bois abouté d'épinette noire a été obtenue avec une pression d'assemblage de 3,43 MPa (498 psi). Une pression plus basse ou plus élevée peut provoquer une résistance inférieure à la traction.

## 4.2 Abstract

---

Finger-jointed black spruce (*Picea mariana* (Mill.) B.S.P) specimens from Eastern Canada were prepared to assess the effect of curing time and end-pressure on the tensile strength of the joints. An isocyanate adhesive cured at room-temperature and a feather joint configuration were used for this purpose. The joints were machined at a 18.3 m/min (60 feet/min) feed rate, 3500 rpm rotation speed, and 0.86 mm (0.034 inch) feed per knife (chip-load). A single-face glueline application was used at a spread rate of 110 g/m<sup>2</sup>. Four curing times (1, 2, 5 and 24 hours) and six end-pressures ranging from 1.38 MPa to 4.82

MPa (200 to 700 psi) applied for 20 seconds were tested. The results showed that curing time and end-pressure have a statistically significant influence on the performance of structural finger-joints. After 5 hours of curing time, finger-joints made with isocyanate can achieve more than 90% of the reference ultimate tensile strength based on 24 hours curing time. Analysis also indicated that finger-joined black spruce has the best performance at an end-pressure of 3.43 MPa (498 psi). Lower or higher end-pressure can result in a lower tensile strength.

---

Finger-joints are commonly used to produce Engineered Wood Products from short pieces of lumber. Such joints must have excellent mechanical performance. To be suitable for structural uses, a joint must be subjected to a proper end-pressure following machining and adhesive application. To produce acceptable products, technical parameters, such as machining and gluing process must be optimized. The conditions of curing time and the pressure applied during joining play a major role in the gluing process and the final strength of the assemblies (Centre Technique du Bois 1973).

Isocyanate based adhesives such as polyurethane (PUR) are a viable alternative for wood finger-jointing applications. They are gaining acceptance in North America for a variety of structural applications (Chen 2001, Lange *et al.* 2001, Verreault 1999). PUR adhesives develop a high strength and cure at ambient conditions. Hot pressing or radio frequency treatments can be used to accelerate the curing process. Studies by Pagel and Luckman (1984a) and Pagel and Luckman (1984b) have shown that PUR bonded joints did not fail in creep and had good water resistance. King and Chen (2001) investigated the performance of a two-part polyurethane adhesive for finger-joint application and for I-joist assembly using various curing times. They tested black spruce among other species. Results showed that the adhesive cured in a relatively short time, which makes it suitable for finger-joint processing. However, no information is available on the influence of end-pressure using this type of adhesive for finger-jointing black spruce. Thus, end-pressure and curing time need to be further investigated for finger-joined black spruce made with

isocyanate in order to determine optimum conditions for the production of finger-joints for structural applications.

The main function of the pressure is to bring the mating surfaces so close together that the glue forms a thin and continuous film between them. This pressure also allows a uniform distribution of the adhesive and creates an optimum glueline thickness. Several authors have investigated the effect of the glueline thickness on strength of finger-joints (Groom and Leitchi 1994, River 1994, Sandoz 1984, Ebewele *et al.* 1979). They indicated that it is necessary to control the glueline thickness to produce strong joints. Thin glue lines lead to starved joints. Above the optimum glueline thickness, stress concentration develops in the adhesive layer due to cure-shrinkage. The pressure must be applied to force fingers together to form an interlocking connection, giving a certain immediate handling strength (Raknes 1982). The increase of the end-pressure up to a certain point gives a better contact of the finger to obtain strong joints. However, cell damage or splitting of the finger root can be induced by excessive pressure (Kutscha and Caster 1987, Marra 1984, Jokerst 1981).

Several opinions exist regarding the amount of pressure needed to produce high-strength finger-joints. The German standard DIN 68-140 (Deutsches Institut fuer Normung 1971) specifies minimum acceptable values for the different lengths of finger for example, 11.77 MPa (1707 psi) for 10 mm (0.4 inch) fingers and 1.96 MPa (284 psi) for 60 mm (2.4 inch). The German standard also establishes that a minimum pressure of 0.98 MPa (142 psi) must be applied (Deutsches Institut fuer Normung 1971). Strickler (1980) stated that an end-pressure of about 2.76 MPa (400 psi) is near optimum for most softwood species. With an increase in end-pressure, a better contact between the sides of the finger is obtained and the gap between fingertip and root reduced. Thus, as a higher pressure is applied, more locking efficiency and performance can be obtained up to the point where damage to the tips of fingers or splitting of the wood occur (Dawe 1965). Madsen and Littleford (1962) used end-pressures between 0 and 4.14 MPa (600 psi) with casein and phenol-resorcinol adhesives. Their results showed that 2.76 MPa (400 psi) end-pressure was adequate to facilitate curing and to develop optimum tensile strength. Juvonen (1980) also studied the effects of the end-pressure on joint strength but considering the geometry and size of the

finger. The end-pressure had a relatively small effect on the long fingers, therefore, adequate joints could be obtained with a relatively low end-pressure. However, with shorter fingers, the effect of end pressure in the low range was greater. As a result, a certain minimum pressure is required depending on the size of finger. Recently Ayarkwa *et al.* (2000) tested three end-pressures on finger-joined African hardwoods. Results showed no significance of this parameter on MOR and MOE in flexion. On the other hand, Sandoz (1984) noted that a “back pressure” can be obtained during the phase of relaxation of the pressure, which can cause separations and lead to adhesive-free gaps at the end of the finger.

In most of the cited studies, with different species, information is lacking about wood machining parameters, wood conditions, and finger-joint configuration. Therefore, the literature does not provide a comprehensive understanding of relationships between the various factors in relation with end-pressure for any particular species.

The final stage in manufacturing finger-joined wood products is the curing of the adhesive. Most of the adhesives commonly used require long periods to set completely which is inconvenient and interferes with production. The adhesives in general must be heated to reduce the curing time either before or after application of the adhesive using radio-frequency (RF) or conventional oven. The level and variation of moisture content in wood is very important because water absorbs energy and it interferes with the heating process. Also heating equipments required are expensive to buy, operate, and maintain.

The effect of curing time and end-pressure on the performance of finger-joints of black spruce is important in the finger-jointing process. In this investigation, we studied the structural performance of finger-joined black spruce wood glued with an isocyanate adhesive, cured at four curing times and six end-pressure levels.

### **4.3 Material and methods**

Experiments were carried-out with 38 mm by 64 mm (2- by 3- inch), kiln dried planed black spruce stud coming from the Chibougamau region in the province of Quebec.

The studs were placed in a conditioning room at 20°C and 65 percent relative humidity to reach equilibrium moisture content (EMC) of 11.8 %. Defects were removed from pieces by cross-cutting to produce blocks varying in length between 20 and 91 cm of N° 2 and better grades (National Lumber Grades Authority 2000a). The defecting and sampling process was based on the Canadian National Lumber Grades Authority NLGA-SPS 1-2000 specifications for structural joined wood (National Lumber Grades Authority 2000b).

A Conception RP 2000 machine with a lateral feed system, commonly in the North American finger-jointing industry was used. The ends of the blocks were machined across their width in order to obtain horizontal finger-joints. A feather profile was selected due to its good mechanical performance (Bustos *et al.* 2003). A chip-load of 0.84 mm (0.034 inch) was obtained by setting the machine at 18.3 m/min (60 feet/min) feed speed, and 3500 rpm rotation speed, with 6 knife sets (bolts) per tool. The finger-joint geometry was 28.27 mm length (1.113 inch), 0.76 mm (0.030 inch) tip width, and 6.69 mm (0.263 inch) pitch. After finger-jointing, the blocks were glued with an adhesive formulation according to the technical recommendations supplied by the adhesive manufacturer. The adhesive was a two component system consisting of an ISOSET UX-100 polyurethane prepolymer mixed with an ISOSET WD3-A322 emulsion polymer. These two components have to be mixed immediately prior to use. A single-face glueline application was used at a spread rate of 110 g/m<sup>2</sup>. The assembled joints were pressed at 20°C. The end-pressure ranged from 1.38 MPa (200 psi) to 4.90 MPa (700 psi) and was applied for 20 seconds. The finger-joined lumber was cross-cut at 2.44 m (8 feet) to obtain specimens for tension tests. The specimens for the end-pressure effect were mechanically tested after twenty-four hours of curing at room temperature. For the curing time effect, the specimens were assembled at 3.75 MPa (544 psi) and were evaluated after 1, 2, 5 and 24 hours of curing time.

Tension tests were performed according to ASTM D-198 (American Society and Materials 1997a) and evaluated according to SPS-1 2000 (National Lumber Grades Authority 2000b) requirements using a Metriguard testing machine, model 412. Testing and data acquisition were controlled with a software developed by Forintek Canada Corp. The ultimate tensile strength (UTS) was calculated. Failure modes were examined around the

joints and classified according to ASTM D-4688 (American Society and Materials 1997b). Following mechanical tests, two samples were cut from each side of the failed joint and moisture content and density were determined following the ASTM D 2395-93 (American Society and Materials 1995). The average basic density of specimens was estimated at 448 kg/m<sup>3</sup>. Since specimens at the testing time were at 11.8% MC, their volume at the green state was adjusted based on a total volumetric shrinkage of 11.1% and a fiber saturation point of 30%.

A one-way analysis of variance (ANOVA) was performed to evaluate the tension data (SAS-GLM procedure) (SAS Institute 1998). The Tukey's studentized range test was applied to identify significant differences at 0.05 probability level. The normality assumption was verified using the Shapiro-Wilk test and the homogeneity of variances by Levene and Bartlett tests. A nonlinear regression analysis was performed to describe ultimate tension strength (UTS) in terms of curing time or end-pressure as independent variables (SAS-NLIN procedure) (SAS Institute 1998). Data points for curing time were fitted with a segmented model that included two sections, one quadratic and one linear, while data for end-pressure effect was fitted with a quadratic equation.

#### 4.4 Results and discussion

A summary of test results showing the influence of curing time on UTS is given in **Table 4.1**. The wood specimens built up enough strength to be handled after 1 hour of curing time, averaging above 26 MPa (3771 psi) of UTS. The ANOVA indicated that statistically significant differences existed among the four curing times studied. However, no significant differences between 1 and 2 hours and neither between 5 and 24 hours were found. Nevertheless, 1 and 2 hours yielded different results than 5 and 24 hours of curing time (**Table 4.1**). Results at 1 hour of curing time do not agree with those reported by King and Chen (2001) who studied the performance of a two-part polyurethane adhesive, ISOSET UX-100, for finger-joint application on 38 mm- by 64 mm (nominal 2- inch by 3-inch) studs of black spruce. The UTS determined by King and Chen (2001) was considerably lower than the results from this study. Furthermore, after 2 hours of curing time the UTS given by King and Chen (2001) was considerably higher than that determined

Table 4. 1. Ultimate tensile strength (UTS) of finger-joined black spruce wood as determined from tension tests with different curing times.

Statistical parameter	Curing time (h)				SPS-1 2000
	1	2	5	24	Proofload tension stress level
Mean (MPa)	25.9 <sup>A*</sup>	26.9 <sup>A</sup>	32.5 <sup>B</sup>	35.2 <sup>B</sup>	6.8
Std. Dev. (MPa)	3.3	2.4	3.5	3.8	-
n	15	14	12	16	-

n: Sample size

\*: Means within a row followed by the same letter are not significantly different at the 5 percent probability level

in this study. Unfortunately, no details were given in King and Chen (2001) paper on the other geometric, operational and machining parameters that affect the process. Personal communications with Chen indicated that black spruce boards (2- inch by 3- inch ) were finger-joined together however test specimens were cut into small strips of 6.4 mm thick x 38 mm wide x 305 mm long (0.25- inch by 1.5- inch by 12- inch) before testing in tension in accordance with ASTM D4688. Furthermore, the spread rate of adhesive was not controlled and the crowding pressure was 2 MPa (300 psi). These explain the differences between the two studies.

The joined wood was generally very strong in tension compared with SPS-1 requirements. Very high strength values were also obtained after 5 and 24 hours of curing, improving the UTS by 25% and 36%, respectively, compared to 1 hour of curing time. Results in this trial suggest that, after 1 hour of curing time at room temperature, finger-joints made with the isocyanate based ISOSET UX-100/A322 could reach more than 70% of the reference strength achieved at 24 hours of curing time. This is quite important for the proof tension test that mills are required to conduct following joints assembly. A segmented regression model with two sections was used to fit all the results: quadratic (parabola) and linear, as shown in **Figure 4.1**. The coefficient of determination was 0.60. The distribution of the data points indicated that the curing time has an influence on the UTS between 1 and 5 hours. King and Chen (2001) indicated that it took about 3 hours for black spruce joined lumber to reach full cure at room temperature. In our case, after 5 hours of curing time, the

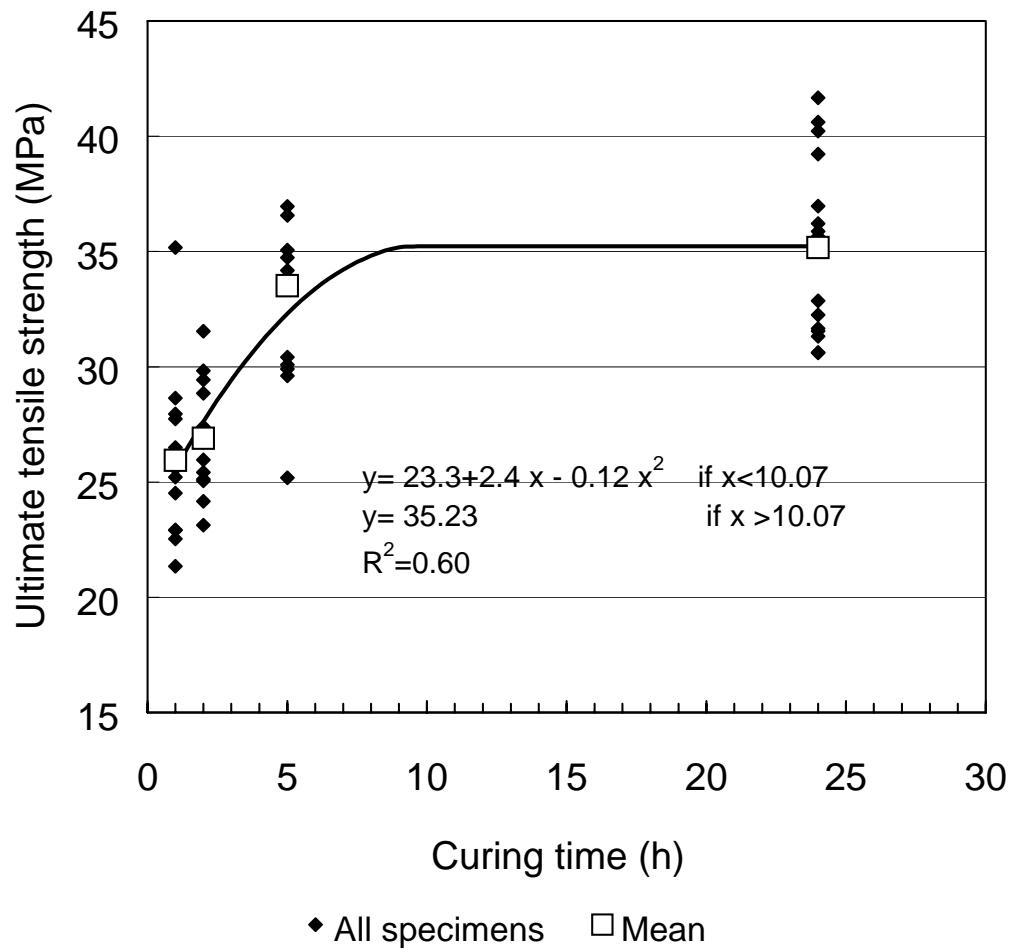


Figure 4. 1. Effect of curing time on the ultimate tensile strength (UTS) of finger-jointed black spruce wood assembled at 3.75 MPa (544 psi) of end-pressure.

performance in tensile strength still increases but slightly until it stabilizes. The segmented regression model estimates that the maximum UTS could be already reached at 10 hours of curing time. Given the variability of results obtained, further investigation is needed to validate this estimation.

The relationship between strength and curing time is important since it shows how long it takes the finger-joint to develop enough strength to be handled without damage

following gluing and assembling. Our experiments show that black spruce finger-joined with ISOSET UX-100/A322 met the proof tensile strength requirements of the NLGA-SPS 1-2000 standard (National Lumber Grades Authority 2000b) for N° 2 and Better (**Table 4.1**), even after one hour of curing time at room temperature.

A summary of results on the influence of end-pressure on UTS is given in **Table 4.2**. The strength of the finger-joint in tension appears to be related to the amount of end pressure applied. The ANOVA indicated statistically significant differences among the six pressure levels ( $p < 0.0001$ ) (**Table 4.2**). A second-degree polynomial was fitted to all data for the six end-pressures (**Fig. 4.2**). The coefficient of determination was found to be low ( $R^2 = 0.22$ ) even though, the relationship was statistically significant ( $p < 0.0001$ ). The UTS increased slightly from 1.35 MPa (196 psi) end-pressure, reached a maximum value at 3.43 MPa (498 psi) and then it decreased as the end-pressure increased (**Fig. 4.2**). This result is not far from the optimum value of 2.76 MPa (400 psi) found by Strickler (1980) for softwood species. Pressure in excess of 3.43 MPa (498 psi) will likely cause a reduction of the UTS, provoking splitting due to compression load at the finger root, even without the tips of fingers reaching the roots of the opposite fingers. On the other hand, an end-pressure of 1.35 MPa (196 psi) was enough for the joined wood to be handled even though it represented the lowest performance on the structural properties. The mean strength value in all tension tests was higher than those specified in SPS-1 2000 (National Lumber Grades Authority 2000b) for S-P-F group, grade No. 2 and better for finger-joined structural lumber (**Table 4.2**).

The quality of the glueline was also evaluated by the percent wood failure developed in the finger-joint according to the ASTM D4688-97 (American Society for Testing and Materials 1997b). Generally, wood failure was high. More than 80% of specimens failed in modes number 3 and 4. Failure mode number 3 is mostly along the joint profile but with some failure at the finger roots while mode 4 is with tensile wood failure occurring at the joint roots and with high over-all wood failure. These modes of failure are usually associated with good gluing in structural finger-joined material. No glue failure was observed, which confirms that the gluing process was adequate. The high performance

Table 4. 2. Ultimate tensile strength (UTS) of finger-joined black spruce wood as determined from tension tests with different end-pressure levels.

	End-pressure (MPa)						SPS-1 2000 Proofload tension stress level
	1.3	2.2	2.8	3.7	4.0	4.9	
Mean (MPa)	26.6 <sup>C*</sup>	31.1 <sup>ABC</sup>	30.4 <sup>ABC</sup>	35.2 <sup>A</sup>	33.6 <sup>AB</sup>	29.2 <sup>BC</sup>	6.8
Std. Dev.	5.0	4.2	5.7	3.8	4.6	4.4	-
N	15	15	15	16	14	14	-

n: Sample size

\*: Means within a row followed by the same letter are not significantly different at the 5 percent probability level

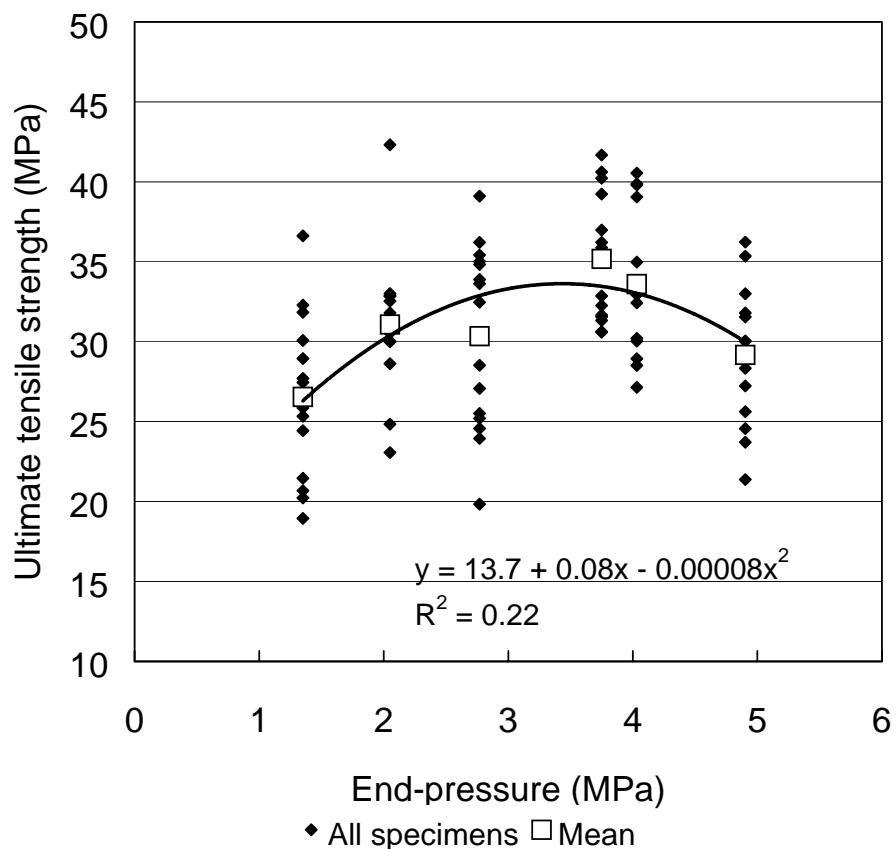


Figure 4. 2. Effect of end pressure on the ultimate tensile strength (UTS) of finger-joined black spruce wood tested after 24 hours of curing time.

among the different curing times and end-pressure of finger-joints studied is an indication of the good bonding quality of the isocyanate adhesive used in this study.

#### **4.5 Conclusion**

Black spruce has a good potential in the finger-jointing with isocyanate adhesive for structural applications. The curing time and end-pressure of structural finger-joints have a significant influence on ultimate tensile strength. The maximum curing time effect takes place between 2 and 5 hours at room temperature. After 1 or 2 hours of curing time at room temperature, finger-joints could reach more than 70% of the reference strength achieved at 24 hours of curing time. After 5 hours of curing time, finger-joints achieve more than 90% of the reference ultimate tensile strength based on 24 hours curing time. On the other hand, an end-pressure of 3.43 MPa (498 psi) was found to be the optimum condition for assembling finger-joined black spruce with isocyanate adhesive. The tensile strength of all finger-joints fabricated using various curing-times and end-pressure treatments met the tensile strength requirements outlined in the Canadian National Lumber Grades Authority (NLGA) SPS 1-2000 (National Lumber Grades Authority 2000b) for structural lumber. The results have also shown that finger-joints of high tensile performance can be produced using the type of isocyanate adhesive studied.

#### **4.6 Literature cited**

American Society for Testing and Materials. 1997a. Standard test methods of static tests of

lumber in structural sizes. ASTM D 198-99. ASTM, Philadelphia, PA. USA. pp. 57-75.

American Society for Testing and Materials. 1997b. Standard test methods for evaluating

adhesives for finger jointing lumber. ASTM D 4688. ASTM, Philadelphia, PA. USA. pp. 373-379.

American Society for Testing and Materials. 1995. Standard test methods for specific

gravity of wood and wood-base materials. ASTM D 2395-93. ASTM, Philadelphia, PA. USA. pp. 348-355.

- Ayarkwa, J., Y. Hirashima, and Y. Sasaki. 2000. Effect of finger geometry and end pressure on the flexural properties of finger-jointed tropical African hardwoods. *Forest Prod. J.* 50(11/12):53-63.
- Bustos, C., R. Beauregard, M. Mohammad, and R.E. Hernández. 2003. Structural performance of finger-joined black spruce wood lumber with different joint configurations. *Forest Prod. J.* (in press).
- Centre Technique du Bois (CTBA). 1973. Technical and economic study of finger-jointing. Book N° 92. Paris. France. 48 pp. (in French).
- Chen, G. 2002. Personal communication. Corporate research and technology innovation. Department of Ashland specialty chemical company. Columbus, OH. USA.
- Chen, G. 2001. Two-part polyurethane adhesive for structural finger joints. Industrial applications of isocyanates and polyurethanes. Proceedings: The wood adhesives 2000 symposium. Section 2 A. : Industrial applications of isocyanates and polyurethanes. Edited by Forest Products Society, South Lake Tahoe, CA. USA. 22-23 June 2000. pp.15-16.
- Dawe, P.S. 1965. Strength of finger-joints. Paper presented at the International Symposium on joints in timber structures. 30 March-1April. Edited by Timber Research and Development Association. London. England. 9 pp.
- Deutsches Institut fuer Normung. 1971. Wood joints: Dovetail joints as longitudinal joints. DIN 68 140. Germany. (Cited by Jokerst (1981))
- Ebewele, R., B. River, and J. Koutsky. 1979. Tapered double cantilever beam fracture tests of phenolic-wood adhesive joints. Part I. Development of specimen geometry; effects of bondline thickness, wood anisotropy and cure time on fracture energy. *Wood Fiber* 11(3):197-213.
- Groom, L.H. and R.J. Leitchi. 1994. Effect of adhesive stiffness and thickness on stress distributions in structural finger joints. *J. Adhesion* 44:69-83.
- Jokerst, R.W. 1981. Finger-jointed wood products. Res. Pap. FLP 382. USDA Forest Serv., Prod. Lab. Madison, WI. USA. 23 pp.

- Juvonen, R. 1980. End pressure for finger-jointing. Proceedings of Production, Marketing and use of Finger-jointed Sawnwood. C.F.L. Prins, ed. Timber Committee of the United Nations Economic Commission for Europe. Martinus Nijhof/Dr. W. Junk Publishers. The Hague, The netherlands. pp.181-189.
- King, T. and G. Chen. 2001. Adhesive and wood. Specialty Wood Journal 4(6):14-18.
- Kutscha, P. and R.W. Caster. 1987. Factors affecting the bond quality of hem-fir finger-joints. Forest Prod. J. 37(4):43-48.
- Lange, D., J.T. Fields, and S.A. Stirn. 2001. Fingerjoint application potentials for one-part polyurethanes. Proceedings: The wood adhesives 2000 symposium. Section 2A: Industrial applications of isocyanates and polyurethanes. Edited by Forest Products Society. South Lake Tahoe, CA. USA. 22-23 June 2000. pp.17-18.
- Madsen, B. and T.W. Littleford. 1962. Finger joints for structural usage. Forest Prod. J. 12(2):68-73.
- Marra, G. 1984. The role of adhesion and adhesives in the wood products industry. In: Adhesives for wood. Research applications, and needs. Edited by Robert H. Gillespie. USDA. Forest Serv., Prod. Lab. Madison, WI. USA. pp. 2-9.
- National Lumber Grades Authority. 2000a. Standard grading rules for Canadian lumber. National Lumber Grades Authority. NLGA. Vancouver, BC, Canada. 238 pp.
- National Lumber Grades Authority. 2000b. Special products standard for fingerjoined structural lumber. NLGA-SPS 1. Vancouver, BC, Canada. 25 pp.
- Pagel, H. F. and E.R. Luckman. 1984a. EPI - a new structural adhesive. Adhesives for wood. Research applications, and needs. Edited by Robert H. Gillespie. USDA Forest Serv., Forest Prod. Lab., Madison, WI. USA. pp. 139-149.
- Pagel, H. F. et E.R. Luckman. 1984b. A new isocyanate containing wood adhesive. IN: Wood Adhesives: Present and future. Journal of Applied Polymer Science. Applied polymer Symposium 40. Edited by A. Pizzi. John Wiley and Sons. pp. 191-202.
- Raknes, E. 1982. The influence of production conditions on the strength of finger-joints. Proceedings of Production, Marketing and use of Finger-jointed Sawnwood. C.F.L. Prins, ed. Timber Committee of the United Nations Economic Commission for

- Europe. Martinus Nijhof/Dr. W. Junk Publishers. The Hague, The Netherlands. pp.154-168.
- River, B. 1994. Fracture of adhesive-bonded wood joints In: Handbook of adhesive technology. Edited by A. Pizzi and K.L. Mitall. New York, NY. USA. pp. 151-177.
- Sandoz, J. 1984. Study of stress dispersion in finger-jointed wood. Work placement research conducted at the Federal Polytechnical School of Lausanne (EPFL). Wood construction chair, IBIOS. 75 pp. Lausanne. Switzerland. (in French).
- SAS Institute. 1998. SAS/Stat users guide, release 6.03 Ed. SAS Institute, Inc., Cary, N.C. USA.
- Strickler, M.D. 1980. Finger-jointed dimension lumber - past, present, and future. Forest Prod. J. 30(9):51-56.
- Verreault, C. 1999. Performance evaluation of green gluing for finger jointing. Forintek Canada Corp. Eastern Div., CFS-VA internal report No. 2295. Quebec, QC. Canada. 59 pp.

## **Chapitre V**

# **Influence of machining parameters on the structural performance of finger-joined black spruce**

**Cecilia Bustos**

**Roger E. Hernández**

**Robert Beauregard**

**Mohammad Mohammad**

---

The authors are, respectively, Ph.D. Student, Professor and Assistant Professor, Dept. of Wood and Forest Sciences, Laval University, Quebec, QC, Canada, G1K 7P4, and Research Scientist, Forintek Canada Corp., Quebec, Canada G1P 4R4. The authors would like to thank technicians from the Dept. of Wood and Forest Sciences at Laval University as well as those from the Value Added Products and Building Systems Departments at Forintek Canada Corp. for their technical support. Acknowledgements are also made for the financial support given by the Canadian Forest Service, and for the Bío-Bío University, Concepción, Chile, as well as Ashland Adhesives, for their valuable support.

---

## 5.1 Résumé

---

L'épinette noire (*Picea mariana* (Mill.) B.S.P.) a été récemment introduit dans l'est du Canada pour la fabrication des produits de bois abouté. Cependant, peu d'information est disponible sur les principaux paramètres qui affectent le procédé de fabrication de bois abouté. L'objectif principal de ce travail fut donc d'évaluer les effets des paramètres d'usinage du bois sur la résistance à la rupture en traction (UTS) des produits aboutés d'épinette noire afin d'optimiser la performance mécanique du produit. Les paramètres évalués furent l'avance par couteau et la vitesse de coupe. Un joint sans épaulement a été utilisé avec un adhésif à base d'isocyanate et une pression d'assemblage de 3,43 MPa. Une analyse factorielle a montré une interaction significative entre la vitesse de coupe et l'avance par couteau sur la UTS. Parmi l'étendue des valeurs étudiées, la vitesse de coupe a été la variable la plus significative qui affecte la performance du bois abouté d'épinette noire. L'influence de l'avance par couteau sur la résistance en traction des joints à entures multiples a été plus basse, étant évidemment à basses vitesses de coupe. Les résultats ont indiqué que de bonnes performances mécaniques peuvent être obtenues avec une vitesse de coupe entre 1676 m/min et 2932 m/min et entre 0,64 et 0,86 mm d'avances par couteau. Cependant, à l'intérieur de cette étendue la condition optimale d'usinage a été obtenue à 2932 m/min de vitesse de coupe et 0,64 mm d'avance par couteau. L'analyse d'image par microscope électronique des cellules endommagées a confirmé l'effet de la vitesse de coupe sur le procédé d'aboutage du bois. En général, la profondeur de cellules endommagées était plus élevée à mesure que la vitesse de coupe augmentait.

## 5.2 Abstract

---

In Eastern Canada, black spruce (*Picea mariana* (Mill.) B.S.P.) has recently been introduced in the finger-jointing industry. However, little information is available on some of the key manufacturing parameters that influence the finger-jointing process. Therefore, the main objective of this work was to evaluate the effect of wood machining parameters on the ultimate tensile strength (UTS) of finger-joined black spruce in order to optimize the product performance. Parameters investigated in this study were the chip-load and the cutting speed. A feather profile was selected with an isocyanate-based adhesive and an end-

pressure of 3.43 MPa. A factorial analysis showed a statistically significant interaction between cutting speed and chip-load on the UTS. Within the range of values studied, the cutting speed was the most significant variable affecting finger-jointed black spruce. The influence of chip-load on the tensile strength of finger-joints was lower, being apparent only at lower cutting speeds. Results indicated that suitable finger-jointing could be achieved within a range of 1676 m/min and 2932 m/min of cutting speeds with a chip-load between 0.64 mm and 1.14 mm. However, within this range the best result was obtained at 2932 m/min cutting speed and 0.64 mm chip-load. Scanning microscope image analysis of the damaged cells confirmed the effect of cutting speed on the finger-jointing process. In general, the depth of damage was more severe as the cutting speed increased.

---

### **5.3 Introduction and background**

A variety of engineered wood products used for structural applications requires finger-jointing short pieces of wood together. This process needs special attention due to the fact that many factors can affect the performance of finger-jointed wood products. Machining parameters are some of the key elements that could affect the finger-jointing process and, consequently, the quality of the end product.

The machining of finger-joints is usually performed following recommendations given by tool and machine manufacturers. Poor finger-joints are often associated with inadequate machining conditions. Tear-out, for example, is a common defect caused by either worn knives, high feed speed, inadequate cutting speed, too small feed per knife or chip-load and wrong rake angle (ACEco Precision Wood Tooling 2000). The influence of these parameters on the structural behavior of finger-joints is one of the aspects which have not been studied thoroughly, specifically for black spruce.

Careful machining is essential in order to perform appropriate processing of raw material into products with good surface quality for glue application. To produce a good joint, wood surfaces must be machined with sharp tools, and be essentially free of machine marks, chipped or loosened grain, and other surface irregularities (Selbo 1975). Damaged surface and surface layers due to machining conditions have been related to inferior

adhesive-bonded joint performance (River and Miniutti 1975, Murmanis *et al.* 1986, Kutscha and Caster 1987, Reeb *et al.* 1998, Stehr and Östlund 2000, Hernández and Naderi 2001, Hernández and Rojas 2002, Hernández and de Moura 2002, Singh *et al.* 2002). In order to get a good finish on the wood and to prevent burning of the knives, the chip-load must be within a reasonable range (ACEco Precision Wood Tooling 2000). Chip-load is defined as the amount of material removed by each cutting tooth or edge with each revolution of the spindle. A small chip-load will produce too much heat and will either glaze the wood or burn the knives (Wisconsin Knife Works 2000). If chip-load increases, cutter pressure and heat will increase. Both of these factors will increase the rate of wear on the cutting face of the cutter, thus reducing the operating time between sharpenings (ACEco Precision Wood Tooling 2000).

Little information is available on how machining parameters affect the performance of finger-joints. Reeb *et al.* (1998) studied finger-joint quality after 4, 6 and 32 hours of knife wear. Results showed that as knife wear increased, the crushed cell zone in the finger-joints increased in depth. The longer the cutting tools were used, the rougher and more irregular the wood surfaces became. Collins and Walford (1998) evaluated the effects of feed and cutter speeds and the resulting chip loads, on radiata pine finger-jointing quality. Machining speeds were found to be not so critical to joint strength although they may affect the joint appearance. Unfortunately, specific information about the machining parameters was not provided. More recently, a preliminary study on wood machining of finger-jointing black spruce was conducted by Bustos *et al.* (2002) using a polyurethane-based adhesive. Results showed no statistically significant effects of cutting speed and chip-load on the finger-jointing performance of this wood.

During visits to five finger-jointing plants in Eastern Canada, it was observed that various cutting speeds and chip-loads were being used to process black spruce lumber. There was no agreement on which of those machining parameters produced the best mechanical performance of finger-joints. Therefore, the main objective of the present study was to evaluate the effect of cutting speed and chip-load on the structural performance of

finger-joined black spruce, in an attempt to define an operating envelope where good product performance could be achieved.

#### **5.4 Materials and methods**

Experiments were carried out with 38 mm by 64 mm kiln-dried planed black spruce lumber, of stud grade from Chibougamau in the province of Quebec, Canada. The boards were placed in a conditioning room at 20°C and 65% relative humidity to reach a nominal equilibrium moisture content (EMC) of 12%. Defects were removed from boards by trimming to produce blocks ranging in length between 20 to 91 cm and corresponding to the Canadian National Lumber Grades Authority N° 2 and better grade (NLGA 2000a). The defecting process was based on NLGA-SPS 1-2000 specifications for structural finger-joined lumber (NLGA 2000b). A Canadian Conception RP 2000 machine provided with a lateral feed system, common in the North American finger-jointing industry, was used. The ends of the blocks were machined across the width in order to obtain horizontal finger-joints. A feather joint configuration was selected due to its good mechanical performance (Bustos *et al.* 2003a). The finger-joint geometry was 28.27 mm long, 0.76 mm tip, and 6.69 mm pitch. To evaluate the effect of chip-load and cutting speed on the performance of finger-joined black spruce, three chip-loads and three cutting speeds were chosen for this study. Selection was based on the extreme values obtained from a preliminary study carried out by Bustos *et al.* (2002). The chip-load values were 0.64 mm, 0.86 mm and 1.14 mm. The cutting speeds were adjusted to obtain 1676 m/min, 2932 m/min and 3770 m/min using 6 sets of knives (bolts) per tool for each chip-load condition. These cutting speeds were determined from the outermost position of the knives (267 mm of diameter, corresponding to the tip of the knife). Knives and tools were freshly sharpened and kept in good cutting conditions during the finger-jointing process.

Following finger-jointing, the blocks were glued with an adhesive formulation according to the technical recommendations provided by the adhesive manufacturer. The adhesive was a two-component system consisting of an ISOSET UX-100 polyurethane prepolymer mixed with an ISOSET WD3-A322 emulsion polymer. These two components have to be mixed immediately prior to be used. A one-face glue application was used at a

spread rate of 110 g/m<sup>2</sup>. The assembled joints were pressed at 20°C with a constant end pressure of 3.43 MPa for 20 seconds, in accordance with previous results reported by Bustos *et al.* (2003b). The joined pieces were then crosscut at 2.44 m long for tension tests. The sample size varied between 25 to 34 replicates. Specimens were mechanically tested after twenty-four hours of curing time at room conditions.

Tension tests were performed in accordance with ASTM D 198 standard (1997a) with a Metriguard machine, model 412 and evaluated according to NLGA-SPS 1-2000 specifications for structural finger-joined lumber. Testing and data acquisition were controlled using a software developed at Forintek Canada Corp. The ultimate tensile strength (UTS) was calculated based on the actual cross section area. Failure modes were examined around the joints and classified in accordance with ASTM D 4688 standard (1997b). After tension test, two samples were cut from each side of the failed joint, and moisture content (MC) and density were determined based on ASTM D 2395 standard (1995). The mean basic density of specimens was estimated at 437 kg/m<sup>3</sup>. Since specimens at the time of testing were at 11.6% MC, their volume at the green state was adjusted considering a total volumetric shrinkage of 11.1% and a fiber saturation point of 30%.

Scanning electron microscopy (SEM) evaluation was performed to quantify the damage occurred in wood during machining. Three failed tension specimens from each of the nine wood machining conditions studied were randomly chosen to obtain samples for this analysis. UTS values of these specimens were recorded to relate the cell damage with the mechanical performance. Blocks of about 1 cm<sup>2</sup> of transverse area, including the glueline, were removed from the nearest unfailed joint remaining on the tension specimen. The blocks were prepared with a razor blade by carefully cutting the end-grain surface. The blocks were then desiccated with phosphorus pentoxide over two weeks, mounted on a standard aluminum stub with silver paint, redesiccated and coated with gold palladium in a sputter-coater. Electron micrographs of representative sub-surfaces were taken for each of the nine machining conditions. The depth of damage and glueline thickness were evaluated at five systematically chosen points from each SEM micrograph.

A factorial experiment design was used to evaluate the main effects and the interaction between two factors: cutting speed and chip-load on the ultimate tensile strength of finger-joined black spruce (SAS-GLM procedure, SAS Institute 1998). Fisher Protected LSD's multiple comparisons tests were performed to determine differences among means (5 percent probability level). These comparisons were made with Bonferroni corrections as required. The normality assumption was verified using the Shapiro-Wilk test and the homogeneity of variances by Levene and Bartlett tests. A multiple regression analysis was performed to determine the relationship between cutting speed and wood orientation on depth of damage. For this, the stepwise procedure of SAS was used and the selection or exclusion of the independent variables in the model was set at the 10% probability level. To evaluate the relative importance of each independent variable on depth of damage variation, the regression coefficients were standardized by calculating the beta coefficients.

## 5.5 Results and discussion

### 5.5.1 Effects of wood machining parameters

Mean values and standard deviations of the ultimate tensile strength (UTS) as a function of cutting speeds and chip-loads are given in **Table 5.1**. All strength results met the proof tensile strength specifications of NLGA-SPS 1-2000 (NLGA 2000b). In fact, the mean UTS values using different cutting conditions were more than twice those specified in this standard. Moisture content (MC) of wood averaged about 11.6%, within a range of 10% and 12%. Values of UTS were then adjusted to 12% MC as proposed by Kretschmann and Green (1999) in order to facilitate comparisons among the joints tested. Analysis of variance (ANOVA) indicated a statistically significant interaction effect between cutting speed and chip-load on UTS ( $P = 0.05$ ). The multiple comparisons showed that there are significant differences among the three cutting speeds for each chip-load condition applied. In general, lower UTS values were associated with higher cutting speed (3770 m/min) for each chip-load condition (**Fig. 5.1**). This could be due to a damage occurring near and at the glued surface as a result of the high speed at which the knives pass through the wood. Results at 0.86 mm of chip-load were not in agreement with a preliminary study carried out by Bustos *et al.* (2002). Bustos *et al.* (2002) worked at the same chip-load with

Table 5. 1. Ultimate tensile strength (MPa) of finger-joined black spruce machined at three different cutting speeds and three chip-loads<sup>a</sup>.

Chip-load (mm)	Cutting speed (m/min)			SPS-1 2000 Proofload tension stress
	1676	2932	3770	
0.64	34.7 (7.3) <sup>b</sup> Aa <sup>c</sup>	37.4 (5.9) Aa	31.5 (4.7) Ab	
0.86	38.1 (6.7) Ba	34.1 (5.4) Ab	31.5 (4.0) Ab	6.8
1.14	35.0 (6.7) Aa	35.1 (5.6) Aa	31.1 (5.1) Ab	

<sup>a</sup> Number of replicates varied between 25 and 34.

<sup>b</sup> Numbers in parentheses are the standard deviations

<sup>c</sup> Means within a column or row followed by the same letter are not significantly different at the 5 percent probability level. Uppercase letters are for chip-load comparison (column) and lowercase letters are for cutting speed comparison (row), for each cutting speed and chip-load separately.

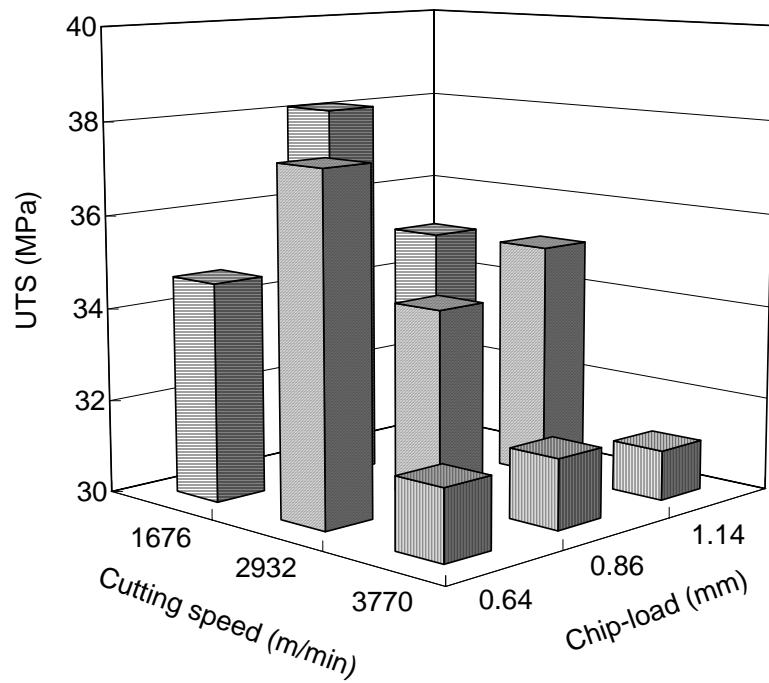


Figure 5. 1. Influence of cutting speed and chip-load on the ultimate tensile strength (UTS) of finger-joined black spruce.

five cutting speeds ranging between 1676 m/min and 3770 m/min. Findings from that study indicated that the joint strength was not affected by cutting speed variation. This result could be attributed to the small sample size used in the previous study. Similar investigations carried out by Collins and Walford (1998) indicated little effects of feed and cutting speeds and resulting cutter mark spacing on joint strength. However, no details on the machining parameters were given in their work. Collins and Walford (1998) stated that the energy required to cut a joint increases with increasing cutting speed and with reducing mark knife spacing.

The highest values of UTS occurred between 1676 m/min and 2932 m/min. At least the upper value for cutting speed falls within the range given by ACEco Precision Wood Tooling (2000), which indicates that most commercial cutting speeds for finger-jointing in USA are between 2512 m/min and 3016 m/min. The lower limit obtained here is probably due to the fact that black spruce wood was not considered by ACEco Precision Wood Tooling (2000).

On the other hand, Fisher multiple comparisons tests showed few statistically significant differences ( $P = 0.05$ ) among the three chip-loads used for finger-jointing black spruce (**Table 5.1**). These differences were present at 1676 m/min cutting speed, where a chip-load of 0.86 mm performed better than 0.64 mm and 1.14 mm. At 2932 m/min cutting speed, differences were not statistically different, even though the probability level was close to 0.05 ( $P = 0.08$ ). For this cutting speed, the higher UTS value was obtained at 0.64 mm chip-load. Results obtained at 2932 m/min of cutting speed are in agreement with those reported by Bustos *et al.* (2002). The chip-load values recommended by tool manufacturers, such as ACEco (2000) and Wisconsin Knife Works (2000), vary between 0.38 mm and 0.53 mm, for optimum tool life.

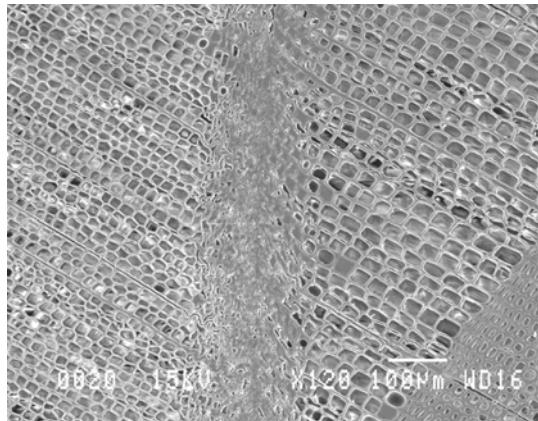
The impact of knife wear on the adherent surfaces of finger-joint specimens was studied by Reeb *et al.* (1998), who reported that as knife wear progresses, the adherent surfaces becomes rougher and more irregular. Furthermore, as chip-load decreases, the cutters will rub rather than cut, which produces friction and dulls the cutting edge

prematurely, and might possibly burn the wood (ACEco Precision Wood Tooling 2000). This effect was not studied in the present study.

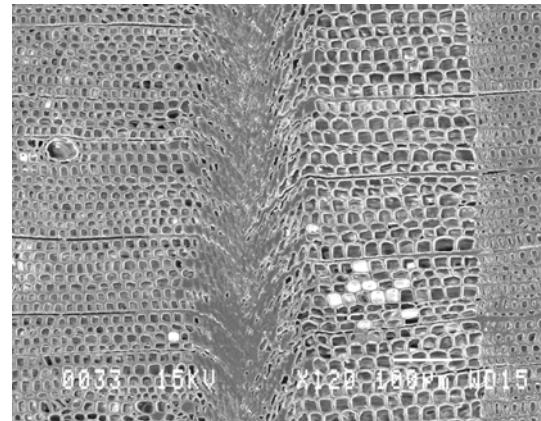
The quality of the glueline was evaluated by the percent wood failure developed in the finger-joint based on ASTM D 4688 standard (ASTM 1997b). Generally, wood failure was high for all types of finger-joints tested. More than 80% of specimens failed in modes numbers 3 and 4. Failure mode number 3 occurs mostly along the joint profile but with some failure at the finger roots. Failure mode 4, on the other hand, is associated with wood failure occurring at the joint roots and with high overall wood failure. Such failures are most common in structural finger-joined wood. Almost no glue bond failure was observed, which confirms that the gluing process was adequate.

### **5.5.2 SEM analysis of transverse glueline faces**

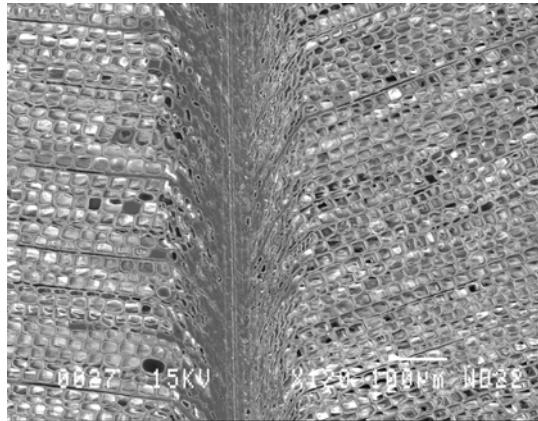
SEM analysis on transverse sections of specimens showed that the thickness of the glueline was similar for all machining conditions studied. However, crushed and collapsed cells were observed near or at the glueline (**Fig. 5.2**). Traqueids far away from the glueline had a normal appearance however, traqueids near and at the glueline were highly compressed. The rays were also distorted. In latewood (LW), damage was less severe than in earlywood (EW), probably due to the higher density of LW (**Fig. 5.2**). The severity of damage was variable within each wood machining condition. Thus, the depth of damage was measured in three typical specimens for each of the nine wood machining conditions (**Table 5.2**). Factorial experiment analysis showed no interaction effect between cutting speed and chip-load on the depth of damage. However, significant differences were found in the principal effect of cutting speed. In general, surface damage was more severe as cutting speed increased. Results revealed that the highest value of depth of damage (134  $\mu\text{m}$ ) was reached at 3770 m/min of cutting speed, which is 73% higher than the damage obtained at a cutting speed of 1676 m/min (77  $\mu\text{m}$ ). Therefore, it could be concluded that as cutting speed increases more damage is produced at the surface and subsurface of fingers. Such damage could have been magnified by the end-pressure applied. It should be mentioned, however, that the end-pressure applied to assembly blocks in the finger-jointing



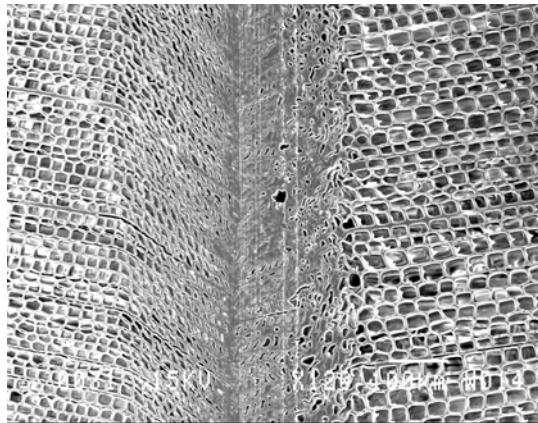
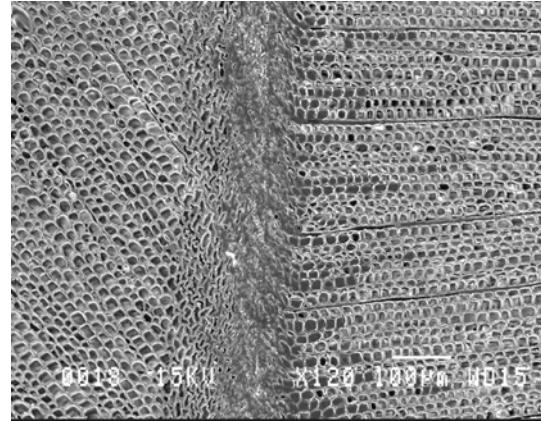
Depth of damage = 70  $\mu\text{m}$  (chip-load of 0.64 mm)



A) Depth of damage = 76  $\mu\text{m}$  (chip-load of 0.64 mm)



Depth of damage = 115  $\mu\text{m}$  (chip-load of 1.14 mm) B) Depth of damage = 108  $\mu\text{m}$  (chip-load of 0.64 mm)



Depth of damage = 281  $\mu\text{m}$  (chip-load of 0.64 mm) C) Depth of damage = 142  $\mu\text{m}$  (chip-load of 0.86 mm)

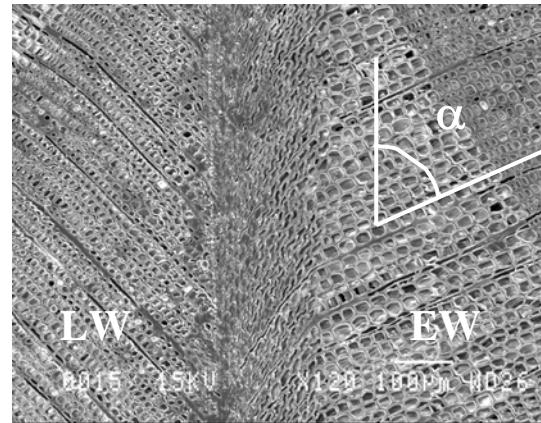


Figure 5. 2. SEM micrographs of finger-joined black spruce transverse section, machined at a cutting speed of: A) 1676 m/min, B) 2932 m/min , and C) 3770 m/min, showing surface damage occurred during machining.

process was kept constant for all cutting conditions (3.43 MPa) and selected in accordance with a previous work by Bustos *et al.* 2003b). The factorial experiment analyses performed on the UTS values did not show any interaction between cutting speed and chip-load on specimens used for SEM analysis. Failure to observe the same pattern of interaction between the two machining parameters for cell damage as observed for UTS might come from the different sample size used in the analyses. Moreover, as for the UTS results, there were significant differences in the principal effect of cutting speed on the depth of damage (**Table 5.2**). As cutting speed increased the surface damage increased and, consequently, the gluing process was negatively affected which lead to lower mechanical performance. Singh *et al.* (2002) reported that extensive damage to wood cells is responsible for the inferior glue bonding with dull knife-planed wood surfaces. In this study, a reduction of 35% in UTS was observed when going from a cutting speed of 1676 m/min to 3770 m/min (chip-load values pooled). The effect of cutting speed on UTS could have been even more pronounced after accelerated aging of specimens (Jokerst and Stewart 1976, Caster *et al.* 1985 and Hernández 1994). Therefore, SEM analysis confirms the effect of the cutting speed on the UTS variation in finger-joined black spruce.

Observations of SEM samples indicated that the depth of damage appears to be affected by the orientation of rays within the sample with respect to the glueline ( $\alpha$ ). In general, more significant damage was observed when rays were not at a right angle to the glueline. When the angle formed between the rays and the glueline is about  $90^\circ$ , the ray walls seem to resist and counteract the action of the knives during machining. However, if the angle is about  $45^\circ$ , the cutters are pressing the tracheids and the rays directly, provoking more distortion. A multiple stepwise regression analysis was performed in order to describe the depth of damage measured in the worst damaged side of the glueline as a function of the ray orientation and the cutting speed. The multiple regression model was expressed by the following equation:

Table 5. 2. Depth of damage measured from SEM images and corresponding ultimate tensile strength (UTS) of finger-joined black spruce machined at three cutting speeds.

	Cutting speed (m/min)		
	1676 <sup>a</sup>	2932	3770
Depth of damage ( $\mu\text{m}$ )	77.3 (31.3) <sup>b</sup> A <sup>c</sup>	86.2 (39.2) A	133.8 (63.4) B
UTS (MPa)	39.3 (9.5) <sup>b</sup> A <sup>c</sup>	34.6 (7.3) A	25.6 (3.7) B

<sup>a</sup> Number of replicates is 9, values of three chip-loads were pooled because no significant differences were observed among them.

<sup>b</sup> Numbers in parentheses are the standard deviations

<sup>c</sup> Means followed by the same letter are not significantly different at the 5 percent probability level.

$$D = -29.77 + 0.023 V + 0.68 \alpha$$

where:

D = depth of the worst surface damage of the glueline ( $\mu\text{m}$ )

V = cutting speed (m/min)

$\alpha$  = ray orientation with respect to the glueline (from 0 to 90°)

While the model was statistically significant, it explained only 33% of the total variation in D with a coefficient of variation (COV) of 46%. The high COV indicates that this equation cannot be used for predictive purposes. The depth of damage (D) was positively affected by the cutting speed (V) and by the orientation of the rays ( $\alpha$ ). The cutting speed was the most significant parameter affecting the depth of damage. The standard estimates of the regression coefficients (beta coefficients) indicated that the effect of this variable accounted for about 60% of the D variation explained by the regression equation.

Therefore, under conditions given in this study, it is possible to identify certain optimal machining values suitable for finger-jointing black spruce. Cutting speeds higher than 2932 m/min must be avoided given the lowest tensile strength performance observed.

A cutting speed between 1676 m/min and 2932 m/min appears to produce finger-joints with good mechanical performance in black spruce for all chip-loads studied. The feed speeds used under these conditions vary between 7.7 m/min and 24 m/min (**Table 5.3**). The highest UTS value was obtained at 1676 m/min of cutting speed and 0.86 mm of chip-load (**Fig. 5.1**). Given that 1676 m/min was the minimum cutting speed evaluated, it is not clear if a lower cutting speed could have produced better results. This is an important factor that needs to be further investigated. Although there were no significant differences in UTS values among the three chip-loads studied at 2932 m/min, differences were close to be significant ( $P = 0.058$ ). The highest UTS value associated with this cutting speed was obtained at 0.64 mm chip-load. The corresponding feed speed at this point (13.4 m/min) is 30% higher than the highest condition at 1676 m/min and 0.86 mm chip-load (10.3 m/min) (**Table 5.3**). The selection of higher feed speeds has obvious implications on the productivity of the finger-jointer. Thus, the 2932 m/min of cutting speed with 0.64 mm of chip-load would produce 30% more fingers than the 1676 m/min of cutting speed with 0.86 mm of chip-load with virtually the same tensile strength. Higher feed speeds (18 m/min and 24 m/min) can be obtained at 2932 m/min cutting speed with 0.86 mm and 1.14 mm chip-load, respectively. But, the UTS could be reduced by 8.8% and 6.2% with respect to the UTS value at 2932 m/min cutting speed and 0.64 mm chip-load, respectively. Therefore, the latter wood machining condition could be considered as the optimum for finger-jointing black spruce lumber. Moreover, the optimal range of values of cutting speed and chip-load found for finger-jointing black spruce using sharpened knives will eventually be affected by the wear of cutting tools. Further investigation on how wear affects the process is needed. Varying rake angle, and diameter of the cutting circle are other parameters that need to be considered as well.

Table 5. 3. Feed speeds (m/min) required to produce the three cutting speeds and three chip-loads studied in this experiments.

Chip-load (mm)	Cutting speed (m/min)		
	1676	2932	3770
0.64	7.7	13.4	17.3
0.86	10.3	18.1	23.2
1.14	13.7	24.0	30.9

## 5.6 Conclusion

Black spruce has a good potential in finger-jointing for structural applications. The tensile strength of all finger-joints fabricated using various chip-loads and cutting speeds largely met requirements of the Canadian National Lumber Grades Authority (NLGA) SPS 1-2000. Within the range of values studied, cutting speed was the most significant machining parameter affecting the mechanical performance of finger-joined black spruce. The influence of chip-load on the tensile strength of finger-joints was less pronounced, being significant only at lower cutting speeds. Results indicated that suitable finger-jointing could be achieved within a range of 1676 m/min and 2932 m/min of cutting speed and with a chip-load between 0.64 mm and 1.14 mm. However, a cutting speed of 2932 m/min and a chip-load of 0.64 mm appear to be the optimum condition for finger-jointing black spruce. Results also showed that finger-joints of high tensile strength can be produced using the type of isocyanate adhesive studied.

## 5.7 Literature cited

ACEco Precision Wood Tooling. 2000. Industrial Wood Tooling, catalog and technical manual. Idaho, ID. USA. 61pp.

- American Society for Testing and Materials. 1997a. Standard test methods of static tests of lumber in structural sizes. ASTM D 198-99. ASTM, Philadelphia, PA. USA. pp. 57-75.
- American Society for Testing and Materials. 1997b. Standard test methods for evaluating adhesives for finger jointing lumber. ASTM D 4688. ASTM, Philadelphia, PA. USA. pp. 373-379.
- American Society for Testing and Materials. 1995. Standard test methods for specific gravity of wood and wood-base materials. ASTM D 2395-93. ASTM, Philadelphia, PA. USA. pp. 348-355.
- Bustos, C., R.E. Hernández, R. Beauregard, and M. Mohammad. 2002. Investigations on the wood machining parameters of finger-jointing process of black spruce. Proceedings of the 7<sup>th</sup> World Conference on Timber Engineering (WCTE). Timber construction in the new Millennium. Edited by Wan Mahmood Wan Ab. Majid *et al.* Timber joints. 12-15 August. Kuala Lumpur. Malaysia. Vol. 3 . pp. 130-136.
- Bustos, C., R. Beauregard, M. Mohammad, and R.E. Hernández. 2003a. Structural performance of finger-joined black spruce lumber with different joint configurations. Forest Prod. J. (in press).
- Bustos, C., M. Mohammad, R.E. Hernández, and R. Beauregard. 2003b. Effects of curing time and end-pressure on the tensile strength of finger-joined black spruce lumber. Forest Prod. J. (in press).
- Caster, D., N. Kutscha, and G. Leick. 1985. Gluability of sanded lumber. Forest Prod. J. 35(4):45-52.
- Collins, M., and B. Walford 1998. Recent research into structural fingerjointing. New Zealand Engineering. Construction and construction materials. 53(6):24-26.
- Hernández, R.E. 1994. Effect of two wood surfacing methods on the gluing properties of sugar maple and white spruce. Forest Prod. J. 44(7/8):63-66.
- Hernández, R.E., and N. Naderi. 2001. Effect of knife jointing on the gluing properties of wood. Wood Fiber Sci. 33(2):292-301.

- Hernández, R.E., and L.F. de Moura. 2002. Effects of knife jointing and wear on the planed surface quality of northern red oak wood. *Wood Fiber Sci.* 34(4):540-552.
- Hernández, R.E., and G. Rojas. 2002. Effects of knife jointing and wear on the planed surface quality of sugar maple wood. *Wood Fiber Sci.* 34(2): 293-305.
- Jokerst, R.W., and H.A. Stewart. 1976. Knife-versus abrasive-planed wood: quality of adhesive bonds. *Wood Fiber* 8(2):107-113.
- Kretschmann, D.E., and D.W. Green. 1999. Lumber stress grades and design properties. Chapter 6. In: *Wood Handbook. Wood as an engineering material.* General Technical Report FPL-GTR-113. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. Madison, WI. USA. pp. 6.1-6.14.
- Kutschka, N., and R. Caster. 1987. Factors affecting the bond quality of hem-fir finger-joints. *Forest Prod. J.* 37(4):43.48.
- Murmanis, L., B. River, and H. Stewart. 1986. Surface and subsurface characteristics related to abrasive-planing conditions. *Wood Fiber Sci.* 18(1):107-117.
- National Lumber Grades Authority. 2000a. Standard grading rules for Canadian lumber. National Lumber Grades Authority. NLGA. Vancouver, BC. Canada. 238 pp.
- National Lumber Grades Authority. 2000b. Special products standard for fingerjoined structural lumber. NLGA-SPS 1. Vancouver, BC. Canada. 25 pp.
- Reeb, J. E., J. J. Karchesy, J.R. Foster, and R.L. Krahmer. 1998. Finger-joint quality after 4, 6 and 32 hours of knife wear: Preliminary results. *Forest Prod. J.* 48(7/8):33-36..
- River, B. and V. Miniutti. 1975. Surface damage before gluing-weak joints. *Wood and Wood Products.* 80(7):35-38.
- SAS Institute. 1998. SAS/Stat users guide, release 6.03 Ed. SAS Institute, Inc., Cary, NC. USA.
- Selbo, M.L. 1975. Surfacing wood for gluing. In: *Adhesive bonding of wood.* Technical bulletin N°1512. U.S. Department of Agriculture. Forest Service. Washington, DC. USA. pp. 60-61.

- Singh, A.P., C.R. Anderson, J.M Warnes, and J. Matsumura. 2002. The effect of planing on the microscopic structure of *Pinus radiata* wood cells in relation to penetration of PVA glue. Holz als Roh- und Werkstoff 60 (5): 333-341.
- Stehr, M. and S. Östlund. 2000. An investigation of the crack tendency on wood surfaces after different machining operations. Holzforschung 54 (4): 427-436.
- Wisconsin Knife Works, Inc. 2000. Premium Cutting Tools, 07/00 Catalog. Beloit, WI. USA.112 pp.

# CONCLUSION GÉNÉRALE

L'objectif de cette étude était d'identifier, d'évaluer et d'optimiser le procédé de fabrication des joints à entures multiples de type structural du l'épinette noire (*Picea mariana* (Mill.) B.S.P.). Un sondage auprès des principales usines de bois abouté de l'Est du Canada a été réalisé pour identifier les paramètres les plus importants qui affectent la fabrication d'assemblages par entures multiples. Les paramètres choisis furent le type de configuration de joints, le temps de durcissement de l'adhésif, la pression appliquée lors du jointage, la température du bois, sa teneur en humidité et les différentes conditions d'usinage.

Un adhésif de type isocyanate ISOSET UX-100 mélangé avec une émulsion de polymère ISOSET WD3-A322 a été utilisé pour le collage de blocs avec les entures multiples.

L'évaluation du comportement structural des joints à entures multiples fabriqués selon les différentes conditions des essais a été réalisée au moyen de la contrainte maximale en traction longitudinale (UTS). De plus, l'effet de la configuration de joints fut également évalué au moyen du module de rupture (MOR) en flexion statique. Tous les essais de bois jointé à entures multiples ont été évalués selon les exigences prescrites dans la norme de produits spéciaux NLGA pour le bois de charpente jointé SPS-1. À titre indicatif, l'évaluation du type de rupture en traction a été également constatée d'après la norme ASTM D-4688.

Des essais sur l'influence de la teneur en humidité et de la température du bois avant l'usinage et le collage du bois ont été effectués. Des groupes de blocs de bois ont été conditionnés à des teneurs en humidité de 12%, 17% et 20% H. Vingt-quatre heures avant l'usinage et collage, la température des blocs a été amenée à -5°C, 5°C, 12°C ou 20°C. Un total de dix combinaisons de teneur en humidité et de température du bois, au moment de l'usinage et du collage, ont été étudiées. On retient essentiellement de cette partie de l'étude que les conditions de température et de teneur en humidité au moment de l'usinage et du

collage affectent la performance mécanique du bois abouté d'épinette noire. Le bois abouté et collé à -5°C a montré la plus basse résistance à la rupture en traction longitudinale. Le comportement mécanique des joints collés à des températures de 5°C, 12°C et 20°C fut semblable. Par ailleurs, l'effet de la teneur en humidité sur l'aboutage du bois d'épinette noire s'est avéré peu concluant. Ainsi, la résistance mécanique des joints a augmenté à mesure que la teneur en humidité diminuait de 20% à 12%. Cependant, ce comportement ne fut observé qu'à une seule température (20°C) parmi les quatre étudiées. La résistance mécanique des joints obtenue sous les différentes conditions d'essai a largement dépassé les exigences de la norme NLGA SPS-1.

D'autre part, l'étude bibliographique montra que peu d'information est disponible quant à l'effet de la forme et de la géométrie des joints à entures multiples sur la performance structurale du bois de l'épinette noire. C'est pourquoi une partie de cette recherche fut consacrée à l'évaluation de la performance mécanique du bois abouté de cette espèce avec trois types de formes de joints: sans épaulement, mâle-femelle et inversée. Un essai de flexion et un autre de traction ont été appliqués lors de l'évaluation de la performance mécanique. Les résultats de ces analyses ont permis de démontrer que les trois types de configurations ont eu un très bon comportement mécanique et que les valeurs de résistance ont dépassé celles requises par la norme canadienne SPS-1 pour bois abouté d'épinette noire à usage structural. La résistance à la flexion fut cependant significativement différente entre les trois types de joints. Une tendance similaire a été observée lors des essais en traction, bien que les différences ne furent pas statistiquement significatives. L'analyse a également indiqué que les joints sans épaulement se comportent mieux que les joints mâle-femelle et les joints inversés et cela pour les joints de type horizontal. Cette différence fut due principalement à la plus grande proportion de surface de collage et à la non-existence des épaulements dans ce profil comparé avec les deux autres types de configurations.

Par ailleurs, un autre volet de cette recherche fut consacré à évaluer l'effet du temps de durcissement de l'adhésif et de la pression d'assemblage des joints à entures multiples sur la résistance en traction longitudinale. Un adhésif de type isocyanate, durci à la

température de la pièce, et une configuration de joint de type sans épaulement ont été employés. Quatre durées de durcissement (1, 2, 5, et 24 heures) et six pressions d'assemblage s'étendant de 1,38 MPa à 4,82 MPa ont été évaluées. Les résultats ont démontré que le temps de durcissement et la pression d'assemblage ont eu un effet sur la performance mécanique des joints structuraux à entures multiples. Après 5 heures du temps de durcissement de l'adhésif les joints à entures multiples d'épinette noire peuvent atteindre plus de 90% de la résistance à la rupture en traction longitudinale (UTS) de référence, obtenue à 24 heures de temps de durcissement. La meilleure performance mécanique du bois abouté d'épinette noire a été obtenue avec une pression d'assemblage de 3,43 MPa (498 psi). L'application alors des pressions beaucoup plus élevées ou plus basses peuvent provoquer une résistance inférieure à la traction.

L'originalité de la thèse réside dans l'étude des paramètres d'usinage sur la performance mécanique du bois abouté structural d'épinette noire. Une première partie de ce volet de recherche a consisté en des essais préliminaires. Les paramètres étudiés ont été l'avance par couteau et la vitesse de coupe. La deuxième partie de ce même volet a été consacré à l'optimisation de ces mêmes paramètres, en utilisant un plus grand nombre de répétitions. Trois vitesses d'avance (1676 m/min, 2932 m/min et 3770 m/min) et trois avances par couteau (0,64 mm; 0,86 mm et 1,14 mm) furent étudiés. Une évaluation par microscope électronique a été aussi effectuée afin de quantifier le dommage aux cellules produit par l'usinage des entures. On retient essentiellement de cette partie de l'étude que les paramètres d'usinage tels que la vitesse de coupe et de l'avance par couteau ont un effet sur la contrainte maximale à la rupture en traction longitudinale (UTS) du bois abouté d'épinette noire. La vitesse de coupe affecte de façon plus importante la résistance en traction que l'avance par couteau. L'effet de l'avance par couteau s'est manifesté seulement à 1676 m/min de vitesse de coupe, où la UTS était plus élevée à une avance par couteau de 0,86 mm qu'à 0,64 mm et 1,14 mm.

L'étude des paramètres d'usinage sur la performance mécanique du bois abouté structural d'épinette noire a permis alors de détecter certaines zones plus favorables d'opération. En général, des basses résistances à la rupture en traction longitudinale (UTS)

ont été associées avec des vitesses de coupe élevées (3770 m/min). Des valeurs assez élevées d'UTS ont été atteintes entre 1676 m/min et 2932 m/min de vitesse de coupe et une avance par couteau entre 0,64 mm et 1,14 mm. Il est alors déconseillé d'usiner les entures du bois d'épinette noire avec des vitesses de coupe plus élevées que 2932 m/min. Par ailleurs, l'UTS la plus élevée a été obtenue lorsque les entures ont été usinées à une avance par couteau de 0,86 mm à 1676 m/min de vitesse de coupe. Cependant, il faut considérer également la productivité du procédé. Une vitesse de coupe de 2932 m/min et d'une avance par couteau de 0,64 mm permettrait d'augmenter 30% la vitesse d'avance tout en obtenant une résistance à la rupture en traction longitudinale similaire qu'un procédé à 1676 m/min de vitesse de coupe et 0,86 mm d'avance par couteau. Cette condition peut alors être considérée comme étant optimale lors de l'aboutage du bois d'épinette noire. Ces résultats représentent la plus importante conclusion de cette étude.

L'analyse qualitative et quantitative par microscopie électronique a constitué un autre aspect original de cette étude. Ceci a permis de confirmer l'effet du paramètre de vitesse de coupe sur l'endommagement des cellules et son association avec une faible performance mécanique des joints à entures multiples.

En général, le bois abouté d'épinette noire a eu une très bonne performance mécanique lorsqu'il a été collé avec un adhésif de type isocyanate. Les résistances mécaniques à la flexion et en traction obtenues lors des différents essais ont dépassé les spécifications requises dans la norme SPS-1 2000.

En ce qui concerne l'évaluation du type de rupture en traction, on a constaté que dans tous les cas étudiés, plus de 80% des échantillons ont eu une rupture de type 3 ou 4. Ces types de ruptures confirment qu'il n'y a pas eu de rupture provoquée par un mauvais collage.

Les retombées immédiates de cette recherche sont surtout liées à une meilleure compréhension du comportement du bois d'épinette noire dans le procédé d'aboutage et ne pourra que favoriser le développement de ce type d'application. Les évaluations et les

optimisations obtenues dans le cadre de cette étude peuvent servir comme facteurs d'estimation de la performance mécanique de bois abouté de cette espèce.

Ce travail a mis en évidence la variabilité du procédé d'aboutage du bois de l'espèce d'épinette noire. Cependant, globalement, on peut retenir qu'en contrôlant le plus possible les variables qui affectent le procédé d'aboutage, de bonnes performances mécaniques peuvent être obtenues à partir du bois d'épinette noire. Les recherches entreprises sur ce procédé devraient toutefois être poursuivies afin d'éclaircir certains points. Par exemple, une étude approfondie utilisant notamment des techniques de réduction de la variance mérite d'être réalisée par l'évaluation de l'effet de la température et de la teneur en humidité dans les bois à entures multiples ce qui devrait aider à trouver des tendances quant à la performance mécanique des joints. De plus, cette recherche devrait être complétée par l'exploration de vitesses de coupe plus basses que celles évaluées ce qui permettrait d'apprécier et d'éclaircir la performance mécanique du bois abouté d'épinette noire dans cette zone d'usinage. Par ailleurs, afin de compléter les résultats de cette recherche, une étude de l'effet de l'usure des couteaux sur la performance mécanique de joints à entures multiples d'épinette noire est également nécessaire. La variation des angles d'attaque, des diamètres de cercle de coupe et d'autres facteurs méritent être également considérés. Étant donné l'obtention des paramètres optimaux dans les conditions de cette étude, une validation de tous les paramètres optimisés d'usinage mérite d'être complétée au niveau industriel. De plus, vu le caractère prometteur de ce procédé et de cet adhésif, une étude de faisabilité économique devrait être entreprise sur une base industrielle de façon à vérifier la possibilité de faire concurrence à d'autres adhésifs. Finalement, d'autres études peuvent également se concentrer sur l'évaluation de la demande de puissance et de consommation d'énergie dans ce procédé. Certaines questions pourraient être approfondies dans des études intégrant une autre démarche de recherche telle que l'évaluation de la performance mécanique de joints à entures multiples par des méthodes d'évaluation non destructives.

## Bibliographie

- ACEco Precision Wood Tooling. 2000. Industrial Wood Tooling, Catalogue technique. Idaho. EU. 61pp.
- American Society for Testing and Materials. 1997 a. Standard test methods of static tests of lumber in structural sizes. ASTM D 198-99. ASTM, Philadelphia, PA. EU. pp. 57-75.
- American Society for Testing and Materials. 1997 b. Standard test methods for evaluating adhesives for finger jointing lumber. ASTM D 4688. ASTM, Philadelphia, PA. EU. pp. 373-379.
- American Society for Testing and Materials. 1995. Standard test methods for specific gravity of wood and wood-base materials. ASTM D 2395-93. ASTM, Philadelphia, PA. EU. pp. 348-355.
- Ashland. 1999. Infotech™. Fiche technique. Isoset polyurethane, emulsion polymer adhesives for structural wood application. Ashland specialty chemical company. Specialty polymers and adhesives division. Columbus, OH. EU. 3 pp.
- Ashland. 2002. Fiche technique. ISOSET Polyurethane/emulsion polymer adhesives for structural wood applications. Columbus, OH. EU. 2 pp
- Association des manufacturiers de bois de sciage du Québec, AMBSQ. 1999. Introduction au classement des bois boutés par entures multiples. Manuel de cours. Fascicule 8. Québec, QC. Canada. 65 pp.
- Ayarkwa, J., Y. Hirashima et Y. Sasaki. 2000a. Effect of finger geometry and end pressure on the flexural properties of finger-jointed tropical African hardwoods. Forest Prod. J. 50(11/12):53-63.
- Ayarkwa, J., Y. Hirashima, Y. Sasaki et K. Ando. 2000b. Effect of glue type on flexural and tensile properties of finger-jointed tropical African hardwoods. Forest Prod. J. 50(10):59-68.

- Ayarkwa, J., Y. Hirashima, K. Ando et Y. Sasaki. 2001a. Monitoring acoustic emissions from finger-joints from tropical african hardwoods for predicting ultimate tensile strength. Holzforchung 55(6): 652-600.
- Ayarkwa, J., Y. Hirashima, K. Ando et Y. Sasaki. 2001b. Monitoring acoustic emissions to predict modulus of rupture of finger-joints from tropical african hardwoods. Wood Fiber Sci. 33(3): 450-464.
- Barrett, J.D et W. Lau. 1994. Canadian lumber properties. Édité par E.D. Jones. Conseil canadien du bois. Ottawa, ON. Canada. 346 pp.
- Belley, D. 2002. La consommation de sciages de sapin, épinettes, pin gris et mélèzes par l'industrie de la deuxième et troisième transformation du bois. Ministère des Ressources naturelles. Direction du développement de l'industrie des produits forestiers. Québec, QC. Canada. 53 pp. Consultée 25 mars 2003. [http://www.mrn.gouv.qc.ca/publications/forets/entreprises/consomma\\_sciage\\_sepm.pdf](http://www.mrn.gouv.qc.ca/publications/forets/entreprises/consomma_sciage_sepm.pdf) (Consultée le 25 mars 2003.)
- Bergeron, S., G.Hudon et J. Landry. 1979. Étude mécanique du joint d'aboutage à entures en flexion. Mémoire de fin d'études. Faculté de Foresterie et Géodésie. Université Laval. Québec, QC. Canada. 59 pp.
- Biblis, E. et H. Carino. 1993. Factors influencing the flexural properties of finger-jointed southern pine LVL. Forest Prod. J. 43(1):41-46.
- Bodig, J., B. et Jayne. 1982. Mechanics of wood and wood composites. Van Nostrand Reinhold, New York, NY. EU. 712 pp.
- Bryant, A.H., R. D. Hunt, L. H. Shi et W.G. Ferguson. 1998. Finger joint geometry for optimum results. Proceedings 5<sup>th</sup> world conference on timber engineering. Édité par J. Natterer et J.-L. Sandoz. Polytechnic presses and romandes academics. 17-20 August 1998. Montreux, Suisse. Vol.2. pp. 198-206.
- Bustos, C., R. Beauregard, M. Mohammad et R.E. Hernández. 2001. Effect of joint geometry on the performance of structural finger-jointed black spruce wood. Actes du colloque international RILEM sur des joints en structures du bois, PRO 22. Édité par S. Aicher et H.-W.Reinhardt. Stuttgart. All. pp. 503-512.

- Bustos, C., R. Hernández, R.Beauregard et. M. Mohammad. 2002. Investigations on the wood machining parameters of finger-jointing process of black spruce. Proceedings of the 7<sup>th</sup> World conference on timber engineering. Timber construction in the new Millennium. Édité par Wan Mahmood Wan Ab. Majid *et al.* Timber joints. 12-15 August. Kuala Lumpur, Malaisie. Vol. 3 . pp. 130-136.
- Bustos, C., R. Beauregard, M. Mohammad et R.E. Hernández. 2003a. Structural performance of finger-joined black spruce wood lumber with different joint configurations. Forest Prod. J. (sous presse).
- Bustos, C., M. Mohammad, R. Hernández et R. Beauregard,. 2003b. Effects of curing time and end-pressure on the tensile strength of finger-joined black spruce lumber. Forest Prod. J. (sous presse).
- Caster, D., N. Kutscha et G. Leick. 1985. Gluability of sanded lumber. Forest Prod. J. 35(4):45-52.
- Centre Technique du Bois. 1973. Étude technico-economique de l'aboutage. Série III. Travail mécanique du bois – usinage - fabrication des matériaux dérivés du bois. Cahier N° 92. Paris. France. 48 pp.
- Centre Technique du bois et de l'ameublement. CTBA. 1991. Le collage du bois. Paris. France. 216 pp.
- Chen, G. 2001. Two-part polyurethane adhesive for structural finger joints. Industrial applications of isocyanates and polyurethanes. The wood adhesives 2000 symposium. Section 2 A : Industrial applications of isocyanates and polyurethanes. Édité par Forest Products Society. South Lake Tahoe. CA. EU. 22-23 June 2000. pp.15-16.
- Chen, G. 2002. Communication personnelle. Corporate research and technology innovation. Department of Ashland specialty chemical company. Columbus, OH. EU.
- Collins, M. et B. Walford 1998. Recent research into structural fingerjointing. New Zealand Engineering. Construction and construction materials. 53(6):24-26.

- Conseil national de recherches Canada. 2001. Recueil d'évaluations de produits. Centre canadien de matériaux de construction. Division 6: Bois et plastiques. CCMC 12905-R. ISOSET®PEP Adhesive. Ottawa, ON. Canada. 217-220 pp.
- Dawe, P.S. 1965. Strength of finger-joints. Paper presented at the International Symposium on joints in timber structures. 30 March-1 April. Édité par Timber Research and Development Association. London, Angleterre. 9 pp.
- Deutsches Institut fuer Normung. 1971. Wood joints: Dovetail joints as longitudinal joints. DIN 68 140. Berlin. All. (D'après Jokerst 1981).
- Ebewele, R., B. River et J. Koutsky. 1979. Tapered double cantilever beam fracture tests of phenolic-wood adhesive joints. Part I. Development of specimen geometry; effects of bondline thickness, wood anisotropy and cure time on fracture energy. *Wood Fiber* 11(3):197-213.
- Fröblom, J. 1975. Factors affecting the quality of finger joints manufactured in commercial jointing machines. *Paperi-Ja-Puu*. 57(12):877-885.
- Forest Products Laboratory. 1999. Wood Handbook.. Wood as an engineering material. General Technical Report FPL-GTR-113. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. Madison, WI. EU. 463 pp.
- Forintek Canada Corp. 2001. Carte routière technologique. Bois de sciage et produits à valeur ajoutée. Québec, QC. Canada. 133 pp.
- Gardziella, A., L.A. Pilato et A. Knop. 2000. Phenolic Resins. Chemistry, applications, standardization, safety and ecology. 2<sup>nd</sup> Completely revised edition. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York. NY. EU. 560 pp.
- Gerhards, C.C. 1982. Effect of moisture content and temperature on the mechanical properties of wood: An analysis of immediate effects. *Wood Fiber*. 14(1):4-36.
- Green, D.W. et D.E. Kretschmann. 1994. Moisture content and the properties of clear Southern pine. Res. Pap. FPL-RP-531. USDA Forest Serv., Prod. Lab., Madison, WI. EU. 28 pp.

- Green, D.W. et J.W. Evans. 2001. Evolution of standardized procedures for adjusting lumber properties for change in moisture content. Gen. Rapport technique. FPL-GTR-127. USDA Forest Serv., Forest Prod. Lab., Madison, WI. EU. 50 pp.
- (<http://www.fpl.fs.fed.us/documnts/FPLGTR/fplgtr127.pdf>) (Consultée le 22 janvier 2002.)
- Green, D.W., S.M. Cramer, B. Suryoatmono et D.E. Kretschmann. 2003. On fracture-related causes for reduction in tensile strength of Southern Pine lumber at low moisture content. *Wood Fiber. Sci.* 35(1):90-101.
- Green, D.W., J.W. Evans. 2003b. Effect of low relative humidity on properties of structural lumber products. *Wood Fiber Sci.* 35(2):247-265.
- Groom, L.H. et R.J. Leitchi. 1994. Effect of adhesive stiffness and thickness on stress distributions in structural finger joints. *J. Adhesion* 44:69-83.
- Harris, J.M. 1989. Spiral grain and wave phenomena in wood formation. Springer-Verlag, New York, NY. EU. 214 pp.
- Hernández, R.E. 1994. Effect of two wood surfacing methods on the gluing properties of sugar maple and white spruce. *Forest Prod. J.* 44(7/8):63-66.
- Hernández, R. 1998. Analysis of strain in finger-jointed lumber. Proceedings 5<sup>th</sup> world conference on timber engineering. Édité par J. Natterer and J.-L. Sandoz. 17-20 August 1998. Montreux. Suisse. Vol.1. pp. 145-162.
- Hernández, R.E. et N. Naderi. 2001. Effect of knife jointing on the gluing properties of wood. *Wood Fiber Sci.* 33(2):292-301.
- Hernández, R.E. et G. Rojas. 2002. Effects of knife jointing and wear on the planed surface quality of sugar maple wood. *Wood Fiber Sci.* 34(2): 293-305.
- Hernández, R.E. et L.F.de Moura. 2002. Effects of knife jointing and wear on the planed surface quality of Northern red oak wood. *Wood Fiber Sci.* 34(4):540-552.
- Hoyle, Jr. R. J., M.D. Strickler et R.D. Adams. 1973. A finger-joint connected (FJC) wood truss system. *Forest Prod. J.* 23(8):17-26.
- Janowiak, J. J., P. Labosky Jr, P.R. Blankenhorn et H.B. Manbeck. 1993. Finger-joint strength evaluations of three northeastern Hardwoods. *Forest Prod. J.* 43(9):23-28.

- Jessome, A.P. 1958. The efficiency of scarf joints. Department of Northern affairs and National Ressources. Forestry branch. Forest Products Laboratories of Canada. Ottawa, ON. Canada. F.P.L.Note technique N°9. 18 pp.
- Jessome, A.P. 2000. Résistance et propriétés connexes des bois indigènes au Canada. Forintek Canada Corp. Séries: Publication spéciale SP514F. Ste-Foy, QC. Canada. 37 pp.
- Jokerst, R.W. 1980. The effect of geometry on the performance of structural finger-joints. Proceedings of Production, Marketing and use of finger-jointed sawnwood, United Nations Economic Commission for Europe. Du 15 au 19 Septembre 1980. C.F.L. Prins, Ed. Martinus Nijhof/ Dr. W. Junk Publishers. La Haye, Pays-Bas. pp.169-180.
- Jokerst, R.W. 1981. Finger-jointed wood products. Forest Products Laboratory. Research paper FPL 382. Madison, WI. EU. 23 pp.
- Jokerst, R.W. et H.A. Stewart. 1976. Knife-versus abrasive-planed wood: quality of adhesive bonds. Wood Fiber 8(2):107-113.
- Juvonen, R. 1980. End pressure for finger-jointing. Proceedings of Production, Marketing and use of Finger-jointed Sawnwood. C.F.L. Prins, ed. Timber Committee of the United Nations Economic Commission for Europe. Martinus Nijhof/Dr. W. Junk Publishers. La Haye, Pays-Bas. pp.181-189.
- King, T. et G. Chen. 2001. Adhesive and wood. Specialty Wood Journal 4(6):14-18.
- Kinloch, A.J. 1987. Adhesion and Adhesives. Science and technology. Department of mechanical engineering Imperial College of Science and Technology, University of London, Angleterre. Édité par Chapman et Hall. 441 pp.
- Kollmann, F.F.P. et W.A. Coté. 1968. Principles of wood science and Technology. Vol. 1., Springer-Verlag. New York, NY. EU. 592 pp.
- Kretschmann, D.E. et D.W. Green. 1996. Moisture content-specific gravity relationships for clear Southern pine. Dans: Proceedings of the international wood engineering conference. Édité par Gopu, Vijaya K.A. 28-31 October. Nouvelle-Orléans, LA. EU. Vol.2. pp. 536-542.

- Kretschmann, D.E. et D.W. Green. 1999. Lumber stress grades and design properties. Chapter 6. Dans: Wood Handbook.. Wood as an engineering material. General Technical. Report FPL-GTR-113. Department of Agriculture, Forest Service, Forest products Laboratory. Madison, WI. EU. pp. 6.1-6.14.
- Kutsch, N.P et Caster, R.W. 1987. Factors affecting the bond quality of hem-fir finger-joints. Forest Forest Products Journal 37(4):43-48.
- Lange, D., J.T. Fields et S.A. Stirn. 2001. Fingerjoint application potentials for one-part polyurethanes. Proceedings: The wood adhesives 2000 symposium. Section 2A: Industrial applications of isocyanates and polyurethanes. Édité par Forest Products Society. South Lake Tahoe, CA. EU. 22-23 June 2000. pp.17-18.
- Lamy, C. 1995. Aperçu sur le bois d'ingénierie dans le contexte nord-américain et québécois. Ministère des Ressources naturelles du Québec, Direction du développement de l'industrie des produits forestiers. Québec, QC. Canada. 63 pp.
- Leitchi, R.J. 1988. Structural finger joints under tensile loading modeled with finite elements and strength theory. Proceedings of the 1988 International Conference on Timber Engineering. Du 19 au 22 septembre à Seattle, Washington. Forest Products Research Society. Madison, WI. EU. Vol. 1. pp. 647-653.
- Leitchi, R.J., R.H. Falk et T.L. Laufenberg. 1990. Prefabricated wood composite I-Beams: A literature review. Wood Fiber Sci. 22(1):62-79.
- Madsen, B. et T.W. Littleford. 1962. Finger joints for structural usage. Forest Prod. J. 12(2):68-73.
- Marra, A.A. 1992. Thecnology of wood bonding, principles in practice. Van Nostrand Reinhold, New York, NY. EU. 454 pp.
- Marra, G. 1984. The role of adhesion and adhesives in the wood products industry. In: Adhesives for wood. Research applications, and needs. Edited by Robert H. Gillespie. USDA. Forest Serv., Prod. Lab. Madison, WI. EU. pp. 2-9.
- Ménard, S. 1993. Les colles et le collage du bois. Centre de recherche industrielle du meuble et du bois ouvre (CRIMBO). Victoriaville, QC. Canada. 88 pp.

- Ménard, S. 2000. Poutrelles triangulées en bois, à membrures parallèles et diagonales aboutées, comme système porteur principal de structures horizontales. Thèse de Doctorat N° 2010. École Polytechnique Fédérale de Lausanne. Lausanne. Suisse. 176 pp.
- Moody, R.C. 1970. Tensile strength of finger-joints in pith-associated and non-pith-associated southern-pine 2 by 6's. USDA Forest Service. Forest Product Laboratory. FPL 138. Madison, WI. EU. 20 pp.
- Morkved, K. 1982. Production, marketing and use of finger-jointed sawnwood: an overview. Proceedings of Production, Marketing and use of finger-jointed sawnwood, United Nations Economic Commission for Europe. Du 15 au 19 Septembre 1980. C.F.L. Prins, Ed. Martinus Nijhoff/ Dr. W. Junk Publishers. La Haye, Pays-Bas. pp. 7-13.
- MTS Systems Corporation. 1999. TestWorks R4, Version 4.03, Eden Prairie, MN. EU.
- Murphrey, W.K. et L.E. Rishel. 1972. Finger joint feasibility in furniture production. Forest Prod. J. 22(2):30-32.
- Murmanis, L., B. River et H. Stewart. 1986. Surface and subsurface characteristics related to abrasive-planing conditions. Wood Fiber Sci. 18(1):107-117.
- National Lumber Grades Authority. 2000a. Standard grading rules for Canadian lumber. National Lumber Grades Authority. NLGA. Vancouver, BC, Canada. 238 pp.
- National Lumber Grades Authority. 2000b. Special products standard for fingerjoined structural lumber. NLGA-SPS 1. Vancouver, BC, Canada. 25 pp.
- National Lumber Grades Authority. 2000c. Special products standard for fingerjoined vertical stud use only lumber. NLGA-SPS 3. Vancouver, BC, Canada. 24 pp.
- National Lumber Grades Authority. 2001. Norme de produits spéciaux pour la semelle de bois jointé. NLGA-SPS 4. Vancouver, BC, Canada. 31 pp.
- National Lumber Grades Authority. 2002. Standard specification for evaluation for adhesives for structural glued-wood products (exterior exposure). NLGA SPS Annex A. Vancouver, BC, Canada. 19 pp.
- National Lumber Grades Authority. 2003. Special products standard for face glued lumber- vertical use only. NLGA-SPS 5. Vancouver, BC, Canada. 31 pp.

- Ngangué, Y. 2000. Drying engineered wood products and their components: Impact of moisture content on performance of finger jointing. Project N° 2419, Canadian Forest Service. E-3392. Forintek Canada Corp. Ste-Foy, QC. Canada. 398 pp.
- Pagel, H. F. et E.R. Luckman. 1984a. EPI-a new structural adhesive. Adhesives for wood. Research applications, and needs. Édité par Robert H. Gillespie. USDA Forest Serv., Forest Prod. Lab., Madison, WI. EU. pp. 139-149.
- Pagel, H. F. et E.R. Luckman. 1984b. A new isocyanate containing wood adhesive. Dans: Wood Adhesives: Present and future. Journal of Applied Polymer Science. Applied polymer Symposium 40. Édité par A. Pizzi. John Wiley et Sons. pp. 191-202.
- Parent, B. 2002. Ressources et industries forestières. Portrait statistique. Ministère des Ressources naturelles. Direction du développement de l'industrie des produits forestières. Gouvernement du Québec. Québec. Canada. Édition 2002. 397 pp.
- Pavlov, V.P. 1954. Joining wood longitudinally with toothned tenons. Transl. From Denoaopenerababalyvaishrica I Les oknemicheskia Promzehlennost (Wood Process and wood chem. Ind.) 3(10):5-8. (Cité par Jokerst 1981).
- Pellicane, P. J. et R.C. Moody. 1988. Finite element modeling of finger-jointed lumber. Proceedings of the 1988 International Conference on Timber Engineering. Du 19 au 22 septembre à Seattle, Washington. Forest Products Research Society. Madison, WI. EU. Vol. 1. pp. 899-907.
- Pellicane, P. J. 1994. Finite element Analysis of finger joints in lumber with dissimilar Laminate stiffnesses. Forest Prod. J. 44(3):17-22.
- Pellicane, P.J., K. Stanfill-McMillan et R.J Tichy. 1987. Effects of knots near the finger of finger-jointed dimension lumber. Forest Prod. J. 37(5):13-16.
- Pellicane, P.J., B.O. Hilson et I. Smith. 1986. A critical appraisal of the prospects for the United Kingdom glulam industry. Royaume-Unis. Journal of the Institute of Wood Science. 10(5):202-209.
- Pellicane, P. J., R.M. Gutkowski et C. Jauslin. 1994. Effect of glueline voids on the tensile strength of finger-jointed wood. Forest Prod. J. 44(6):61-64.

- Pellicane, P. J., R.M. Gutkowski et C. Jauslin. 1995. Comparison of optically and mechanically measured deformation in a finger-jointed wood tension specimen. ASTM, Journal of Testing and Evaluation. EU. 23 (2): 136-140.
- Pizzi, A et K.L. Mittal. 1994. Handbook of adhesive technology. Marcel Dekker. New York. NY. EU. 680 pp.
- Qu, Z. et C. Fan. 1988. Tensile strength of glued finger joints in timber structure and recommendation for their series. Proceedings of the 1988 International Conference on Timber Engineering. Du 19 au 22 septembre à Seattle, Washington. Forest Products Research Society. Madison, WI. EU. Vol. 1. pp. 654-662.
- Raknes, E. 1982. The influence of production conditions of the strength of finger-joints. Proceedings of Production, Marketing and use of finger-jointed sawnwood, United Nations Economic Commission for Europe. Du 15 au 19 Septembre 1980. C.F.L. Prins, Ed. Martinus Nijhof/ Dr. W. Junk Publishers. La Haye, Pays-Bas. pp 155-168.
- Reeb, J. E., J. J. Karchesy, J.R. Foster et R.L. Krahmer. 1998. Finger-joint quality after 4,6 and 32 hours of knife wear: Preliminary results. Forest Prod. J. 48(7/8):33-36..
- Richards, D.B. 1958. End gluing lumber. Forest Prod. J. 8(3):99-104.
- Richards, D.B. 1962. High-strength corner joints for wood. Forest Prod. J. 12(9):413-418.
- Richards, D.B. 1963. Improved tips for finger joints. Forest Prod. J. 13(6):250-251.
- Richards, D.B. et F.E. Goodrick. 1959. Tensile strength of scarf joints in Southern Pine. Forest Prod. J. 9(6):177-179.
- River, B. et V. Miniutti 1975. Surface damage before gluing-weak joints. Wood and wood products. 80(7):35-38.
- River, B.H, C.B. Vick et R.H. Gillespie. 1991. Wood as an adherend. Dans: Treatise on Adhesion and adhesives. Édité par J. Dean Minford. Marcel Dekker. New York, NY. EU. pp. 1-230.
- River, B. 1994. Fracture of adhesive-bonded wood joints Dans: Handbook of adhesive technology. Edited by Pizzi and Mitall. New York. NY. EU. pp. 151-177.

- Samson, M. 1980. Effet de la qualité des membrures sur la flexion de composites en bois à âme mince. Une étude expérimentale. Thèse de doctorat, Faculté de Foresterie et de Géodésie, Université Laval, Québec, Canada. 115 pp.
- Samson, M. 1985. Potential of finger-jointed lumber for machine stress-rated lumber grades. *Forest Prod. J.* 35(7/8):20-24.
- Sandoz, J. 1984. Study of stress dispersion in finger-jointed wood. Work placement research conducted at the Federal Polytechnical School of Lausanne (EPFL). Wood construction chair, IBIOS. Lausanne, Suisse. 75 pp.
- Sandoz, J., P. Rastogi et M. Walgenwitz. 1994. Grading and reliability of glued laminated timber. Proceedings of Pacific Timber engineering conference. Published by the Timber Research and Development Advisory council. July 11-15. Gold Coast, Australie. (1):663-670.
- SAS Institute. 1998. SAS/Stat users guide, release 6.03 Ed. SAS Institute, Inc., Cary, NC. EU.
- Selbo, M.L. 1963. Effect of joint geometry on tensile strength of finger joints. *Forest Prod. J.* 13(9):390-400.
- Selbo, M.L. 1975a. End and corner joint construction. Dans: Adhesive bonding of wood. Technical bulletin N°1512. USDA. Forest Serv., Washington, DC. EU. pp. 49-55.
- Selbo, M.L. 1975b. Surfacing wood for gluing. In: Adhesive bonding of wood. Bulletin technique N°1512. USDA. Forest Serv., Washington, DC. EU. pp. 60-61.
- Sellers, T.Jr., J.R. McSween et W.T. Nearn. 1988. Gluing of eastern hardwoods: A review. General technical report SO-71. USDA. Forest Serv. Nouvelle-Orléans, Louisiane. 30 pp.
- Serrano, E. 1997. Finger-joints for laminated beams. Experimental and numerical studies of mechanical behaviour. Lund University. Lund Institute of Technology. Division of structural mechanics. Report TVSM-3021. Lund. Suède. 95 pp.
- Serrano, E. et P.J. Gustafsson. 1997. Influence of bondline brittleness and defects on the strength of finger-joints. Lund University. Lund Institute of Technology. Division of structural mechanics. Report TVSM-3024. Lund. Suède. 17 pp.

- Shuler, C.E., D.A. Grant et R.C Moody. 1979. Evaluation of glued laminated beams of Eastern spruce and eastern Hemlock. Technical section. Forest Prod. J. 29(7):23-28.
- Shuler, C.E. 1980. Response of Eastern spruce fingerjoints to variation in assembly time and moisture content. Wood Fiber. 12(4):227-232.
- Singh, A.P., C.R. Anderson, J.M Warnes et J. Matsumura. 2002. The effect of planing on the microscopic structure of *Pinus radiata* wood cells in relation to penetration of PVA glue. Holz als Roh- und Werkstoff 60 (5): 333-341.
- Smardzewski, J. 1996. Distribution of stresses in finger joints. Wood Sci. Technol. 30(6):477-489.
- Stehr, M. et S. Östlund. 2000. An investigation of the crack tendency on wood surfaces after different machining operations. Holzforschung 54 (2000): 427-436.
- Steiner, P.R. 1986. Bonding wood composites with isocyanates. Canadian Forestry Service, cat. No. Fo 42-91/5-1986E. Edmonton, Al. Canada. 19 pp.
- Steele, P.H., R.E. Kreibich, P.J. Steynberg et R.W. Hemingway. 1998. Finger jointing green Southern yellow pine with a soy-based adhesive. Adhesives Age 40(10):49-55.
- Stewart, H. A. et J.B Crist. SEM Examination of subsurface damage of wood after abrasive and knife planing. Wood Sci. 14(3):106-109.
- Stieda, C.K.A. 1958. An investigation into the strength reducing effects of plain scarf joints in laminated wood beams. Mémoire de MSc. Université d'Alberta. Faculté d'ingénierie de la science. Département de génie civil. Edmonton, Al. Canada. 115 pp.
- Strickler, M.D. 1967. Impression finger jointing of lumber. Forest Prod. J 17(10):23-28.
- Strickler, M.D. 1970. End gluing of green lumber. Forest Prod. J. 20(9):47-51.
- Strickler, M.D. 1980. Finger-jointed dimension lumber- past, present, and future. Forest Forest Prod. J. 30(9):51-56.
- Sunley, J.G. 1980. The structural use of finger-jointing. Proceedings of Production, Marketing and use of finger-jointed sawnwood, United Nations Economic Commission for Europe. Du 15 au 19 Septembre 1980. C.F.L. Prins, Ed. Martinus Nijhof/ Dr. W. Junk Publishers. La Haye, Pays-Bas. pp. 55-59.

- Suomi-Lindberg, L., P. Pulkkinen et R. Nussbaum. 2002. Wood Adhesion and Glued Products. State of the Art – Report. COST Action E13. Chapter 5: Influence of wood component on the bonding process and the properties of wood products. Working Group 1: Wood Adhesives. Édité par Manfred Dunky, Tony Pizzi et Marc Van Leemput. 1<sup>ère</sup> Édition-February 2002. Bruxelles, Belgique. pp. 118-140.
- Tan, Y.E. 1993. Finger-jointed Meranti Tembaga (*shorea leprusula*) for structural use. Proceedings, Adhesive Technology and bonded tropical wood products, 25 to 28 May. Editor, Taiwan Forestry Research Institute. Taipei, Taiwan. pp. 464-472.
- Troughton, G.E et S. Chow. 1977. Qualification tests of finger joints made by the WFPL technique. Departement of fisheries and teh environment canadian Forestry Service. Western forest products laboratory, Vancouver, BC. Canada. V6T 1X2. Rapport d'information VP-X-165. 12 pp.
- Troughton, G.E. et A.E.Gee. 1979: Open-assembly-time effect on wfpl fingerjoint bond quality. Technical Report N° 8. Forintek Canada Corp. Western Forest Products Laboratory. Vancouver, BC. Canada. Novembre 1979. 6 pp.
- Troughton, G.E et S. Chow. 1980. Finger-jointing kiln-dried and unseasoned white spruce lumber using the "WFPL Method". Note technique. Forest Prod. J. 30(12):48-49.
- Turgeon, P.H. 1981. Aboutage et lamellage de bois. .Ministère de l'industrie, du Commerce et du Tourisme. Centre de recherche industrielle du Québec. Québec, QC. Canada. 103 pp.
- Verreault, C. 1999. Performance evaluation of green gluing for finger jointing. Forintek Canada Corp. Rapport interne. CFS-VA rapport # 2295. Ste-Foy, QC. Canada. 59 pp.
- Verreault, C. 2000. Assessment of two green gluing processes for finger jointing. Forintek Canada Corp. Rapport interne. CFS- VA rapport # 2407. Ste-Foy, QC. Canada. 137 pp.
- Viereck, L.A et W.F. Johnston 2002. *Picea mariana* Black Spruce.  
[http://www.forestworld.com/public/silvics/silvics\\_frame.html](http://www.forestworld.com/public/silvics/silvics_frame.html) (Consultée le 12 juin 2002.)

- Vrazel, M.E. 2002. The effects of species, adhesive type, and cure temperature on the strength and durability of a structural finger joint. Thèse de MSc. Department of Forest Products. Mississippi State University. Mississippi. EU. 71 pp.
- Walford, B.G. 2000. Effect of finger length on fingerjoint strength in radiata pine. Proceedings, World Conference on Timber Engineering, July 31-August 3. Session 3.5.2. Whistler, B.C. Canada. 8 pp.
- Wibbens, R.P. 1989. Glued laminated timber. Dans: Concise Encyclopedia of Wood and Wood Based Materials. Édité par A.P.Schniewind. Pergamon Press; Cambridge, Mass.: MIT Press. Oxford. Angleterre. pp. 125-129.
- Wisconsin Knife Works, Inc. 2000. Premium Cutting Tools. Catalogue 07/00. Beloit, WI, USA. 112 pp.

## **ANNEXE A**

### **Résumé du sondage réalisé aux entreprises d'aboutage du bois**

Un sondage a été réalisé dans 5 entreprises d'aboutage du bois au Québec, afin d'identifier les paramètres qui influencent de façon importante ce procédé de transformation. Les aspects étudiés étaient la matière première, les antécédents généraux du procédé d'aboutage tels que l'usinage, l'application de l'adhésif, l'assemblage et le pressage des joints. Les aspects reliés aux essais de contrôle de qualité de joints ont aussi été surveillés. Les résultats de ce sondage sont montrés aux tableaux A1 à A7.

Tableau A. 1. Sondage sur la matière première.

	<b>Usine A</b>	<b>Usine B</b>	<b>Usine C</b>	<b>Usine D</b>	<b>Usine E</b>
Espèce(s)	Épinette noire	Épinette noire (80%). MSR 2100 et 1650 pour structure	Épinette noire 100%,	Épinette noire >90%	Épinette noire >95%
Approvisionnement	Du nord (Côte-Nord et Lac-St.-Jean)	Usines du Lac St. Jean appartenant à l'entreprise Abitibi Consolidated (donc, matière première contrôlée)	De l'usine de Produits Forestiers Alliance à Dolbeau	Nord de l'Abitibi. (Matériaux Blanchet et Scierie Landrienne). Bois pre-raboté et classes en MSR 2100 et 1650	De la région Parc Chibougamau, du Mont Valin et de la Côte-Nord. Achète du bois MSR ou N°2 et Meilleur, sec et raboté.
Type de séchage	Au four (à forfait) et entreposage à l'air libre	90% séché chez eux et 10% séché dans une autre usine de sciage de Abitibi à St-Prime	Le bois est séché, par Alliance et par Cambeau à Dolbeau. À moyenne température (Plus utilisé) et à haute température.	À moyenne température. Surtout fait par les fournisseurs	Paie un bonus à la qualité pour un séchage à $17\% \pm 3\%$ . Selon l'échelle COFI (sapin de Douglas) sur appareil de mesure Delmhorst.
Teneur en humidité (%)	12%-16%	Entre 14 à 17% (<17% à l'échelle Douglas). Vise COV < 20% le matériel > 17% échelle Douglas va au colombage	Vise 16%, obtient entre 12% à 23% (trop variable) utilisation d'un détecteur d'humidité à plaque (capacitance)	Entre 10 à 25% (à l'échelle Douglas), en moyenne 15% à 17%. Alors qu'on viserait plutôt de 11 à 15%.	Moyenne de $17\% \pm 3\%$ cœur-surface (à l'échelle Douglas), en moyenne 12%. La ligne de production possède un détecteur d'humidité à plaques de capacitance (Wagner) ajusté à 19% H.
Température du bois (été, hiver) (°C)	-	Vise 20°C. En dessous de 15°C, c'est critique.	Vise d'avoir le bois à 20-22°C. Le plus froid accepté est 15°C	Entre 10°C à 30°C pendant l'été et 10°C min pendant l'hiver	70°F (21°C)
Espace disponible pour conditionnement (m <sup>2</sup> ). Capacité d'entreposage (en 1000pmp et en heures d'opération)	Capacité de 16 paquets	$\pm 3000\text{pi}^2$ , capacité de 1,5 semaines de production	$2 \times 10^6$ ppm Capacité d'entreposage=3 à 5 jour de production @45000 pmp/faction x 2 faction de 12h/j.	Entrepôt 350.000 pmp de capacité soit d'environ une semaine de production (55 à 60000pmp/faction de 10 h). Au futur il y a un projet pour l'entreposage de $1,4 \times 10^6$ pmp.	Capacité de 1200000pmp de bois MSR ou de 800000 pmp de bois latté. Environ 1 semaine de production (@1000000 pmp/semaine)
Conditionnement (T° et HR)	26°C, 60% HR	Entrepôt chauffé à 20°C mais il ne dispose pas d'injection d'humidité (sans contrôle)	35°C, 50% HR (hiver, trop sec) à 70%	Entrepôt à T° 10°C et 20%-30% HR en hiver. (Ambiant très sec). Chauffage par le plancher	Entrepôt à 30°C et 60% HR. En bas de 60 à 70°F de température du bois.
Temps de conditionnement	Le bois est introduit à l'intérieur deux jours avant d'être usiné.	3 jour en général	3 à 5 jour (le bois rejeté à l'entrée de l'usine pour excès d'humidité, est retourné à l'entreposage approx. 7 jours).	-	Entre 30 à 40 heures en été, pas encore d'expérience en hiver.
Autres	-	-	-	-	11h par session de travail/semaine. Ils achètent le bois vert, autour 75% d'humidité.

Tableau A. 2. Contrôle de la qualité de la matière première.

	Usine A (pour poutrelle aboutée)	Usine B (Selon SPS-1, sauf demande spéciale du client)	Usine C (norme de ligne de maison)	Usine D (Selon SPS-1 2 et meilleur)		Usine E
				En dehors du joint	Au niveau du joint	
Flache sur	max 1/4" sur l'épaisseur et 7/8"	C'est le défaut majeur	-	1/3 de la largeur 1/3 épais pleine longueur. 1/2 largeur 1/3 épais 1/4 de la long.	½ largeur et 1/2 épaisseur	1/3 épais, 1/3 large ou l'équivalent, 2/3 épais par 1/2 large, 1/4 de la longueur.
Déviation du fil	Max 1 dans 10	-	1/10	-	-	1650: 1 dans 10 2100: 1 dans 12
Roulures, fentes, gerces				Roulure de surface: ¼ de la longueur max.	Roulure et fente interdit	
Sur la face	. Max 2" de long					
Sur les côtés	. Non-admis			Roulures à travers: 2' de long max		Non admise dans le joint
Sur les bouts	. Max 3" de long et 3/4" d'épaisseur					
Pourriture non- fermé	Non-admis	Non-admis	Non admis			-
Pourriture fermée	Non-admis	Non-admis		Non admis	Non admis	
Carie alvéolaire	Non-admis	Non-admis				
Piqué blanc	Non-admis	Non-admis	Un peu, enlevé			
Nœuds	max 3/4" de diam.	-	¾ sur la face	-	3/16"max	1650: 1/4" 2100: 1/6"
Trous de nœuds	max 3/4" de diamètre et 1 trou au 2'	-	-	-	3/16"max	-
Autres critères	Max 3/8" de déplacement de résine naturelle					
Au joint de collage	Max 3/8" de déplacement de nœud sain, étoilé	-				
	Max 3/8" de déplacement carie alvéolaire		Trous divers: Ils ne tolèrent aucun par question d'apparence.	-	-	-
Épaisseur de la pièce	1 1/2" Minimum					
Épaisseur: Largeur	2 9/16" (2x3) et 3 9/16" (2x4) Minimum	-	-	-	-	-
Bois altéré	-	-	-	Non admis	Non admis	
Piqué blanc	-	-	-	1/3 volume	Non admis	

**...Continuation de tableau A.2: Contrôle de qualité de la matière première**

	Usine A (pour poutrelle ajourée)	Usine B (Selon SPS-1, sauf demande spéciale du client)	Usine C (norme de ligne de maison)	Usine D (Selon SPS-1 2 et meilleur)		Usine E
				En dehors du joint	Au niveau du joint	
Bois de compression	-	Le bois de compression ne colle pas du tout, il est détecté par les opérateurs et enlevé à l'opération de purge des défauts	Les opérateurs essaient de l'enlever	-	Interdit si dommageable	-
Omission	-	-	-	Touche et manque, avec un max. de 5% des pièces ayant de touche ou manque ou une omission profonde (1/8) n'excédant pas 2" de long.	Rive 1/16" Face 1/16"	Touche et manque sur 5% des pièces ou omission profonde (1/8) n'excédant pas 2" de long
Poche d'écorce, de résine	-	-	-	-	Non admis	-
Brûlure	-	-	-	-	légère	-
Casse rive	-	-	-	-	Non admis	-
Fente	-	-	-	-	-	Non admise dans le joint. Au centre admise
Torsion	-	-	-	-	-	Sur 10% des pièces 4": 1/16" 6": 1/16" 8": 1/16" 10": 1/8" 12": 1/8" 14": 1/8" 16": 1/8"
Gerce	-	-	-	-	-	Non limité

Tableau A. 3. Antécédents généraux du procédé d'aboutage.

	<b>Usine A</b>	<b>Usine B</b>	<b>Usine C</b>	<b>Usine D</b>	<b>Usine E</b>
Marque		Western Pneumatic			
Vitesse de la chaîne	60 pièces/min (considérer 12" d'espace entre pièces)	-	1 taquet par pi. = 12 pouces. (90% production en 2"x3" et 10% en 2"x4")	65% de 150 pieds/min= 98 pieds/min, 12 po entre les taquets	Variable, 40 à 60 taquets/min: 9" de séparation entre les taquets
Vitesse d'avance	60 pièces/min (considérer 12" d'espace entre pièces)	60 pièces/min (considérer 12" d'espace entre pièces)	60 pieds/min	258 pieds/min (Vitesse max 400 pi/min @ 75%)	-
Vitesse de rotation	3600 tr/min	3600 tr/min	Entre 3400 à 3800 tr/min. Exploré entre 4200 et 2800 2800 tr/min n'a pas donné de bons résultats	60% à 75% de 3550 tr/min (têtes à vitesse variable)	2048 tr/min-65%, 2205 tr/min-70%, 2363 tr/min-75 %, 2520 tr/min-80%,
# de couteaux par boulon	5 minces 1 gros	En fonction des produits, mais pour le joint sans épaulement 6 couteaux	D'après le catalogue Wisconsin. .	5 couteaux minces et 1 gros.	5 couteaux mince et 1 gros.
# de boulon par tête	6	6	6	16	10
Configuration des joints	Inversée	Inversée et Sans épaulement	Mâle-femelle	Inversée	Mâle-femelle
Types des couteaux	AC 16-139 AC 16-107	AC-16 139 (Joint de 1.113 po)	Wisconsin. Aiguisage fait à l'extérieur.	ACEco. 16-007 et 16-008	Wisconsin. Types de couteaux (structural): BG-1101 et BG-1102 et pour le (colombage): BG-737 et BG-738.
Angle d'attaque	22°	Set-up angle 16,5°	-	Entre 15° et 20°	15°
Diamètre de porte-outils	150 mm	Cercle de coupe 10,25 po	Cercle de coupe 10,25 po	19,5" (495 mm) au bout des dents ou 16 po tête seulement	13,5" dent à dent
Avance par couteau	0,033 po	0,033po	0,032	0,035	0,026-0,029 po
Marques de couteaux par pouce	30	30	28-32	13,76-36	38
Pression initiale	Non-contrôle	10 psi sur chaque piston hydraulique, ne peux pas connaître la pression exercée sur le bois, presse en continu à 250 pieds/min	Presse en continu, entre 30 et 40 psi (sur les rouleaux)	Presse en continu	Le système d'alimentation est doté de 3 rouleaux roulant respectivement à 450 pieds/min, 380 pieds/min et 350 pieds/min. C'est ce qui génère la pression initiale.
Pression finale	f(espèce)±450psi pour le 2x3	Pas quantifié.	-	-	-
Temps de pression initiale	1 secs (No 2 et Meilleur), 2 secs (MSR)	Temps de cuisson ± 15 secondes (65 pieds de four)	-	-	Tunnel à 280 à 380 pieds/min (vise 350 pieds/min en moyenne), tunnel de 60 pieds
Temps de pression finale	3 secs (temps de cycle 5 secs)	15 min après le pressage et avant essai de traction	-	-	-
Changements des couteaux	Chaque 1000 pieds linéaires	Tous les 4 heures, c'est qui représente 8000 à 10000 joints, plus souvent si fibre arrachée ou si le bruit à l'usinage change ou si le peigne bouge à l'encollage	Chaque 12 heures ou si pas correct (p. ex. si arrachement excessif)	Après 10 heures ou 1 fois/faction, 4 factions/semaine (vendredi maintenance)	Après 11 heures (10 <sup>1/4</sup> heures de production, 615 minutes)
Nombre de joints par semelles	7 joints par semelle	4,5 pieds de longueur des blocs (semelles de 14 à 48 pieds de longueur)	5,5 pieds de longueur moyenne de bloc.	Moyenne entre 42"et 54" (min 13"et max 93") en blocs de 48".	5 pieds de longueur moyenne de blocs

Tableau A. 4. Application de l'adhésif.

	<b>Usine A</b>	<b>Usine B</b>	<b>Usine C</b>	<b>Usine D</b>	<b>Usine E</b>
Type d'adhésif	*Isocyanate à 1 composant) (marque Mira-lok 1075, distribué pour Nacan). Semble meilleure que la colle Résorcinol. Utilisé depuis février	Phénol résorcinol formaldéhyde (Borden J3021) Catalyseur (liquide) FM 7340	Phénol Résorcinol marque Borden 3021 Catalyseur FM 7340	Phénol Résorcinol marque Borden FJ 3021 Catalyseur FM 7340	Phénol Résorcinol marque Borden Cascophen FJ 3021 Catalyseur Cascojet FM 7340
Systèmes d'application	Injection	Willamette. (Mélange de la colle et le catalyseur par cylindre à rotations calibrées)	Willamette Valley	Willamette Valley	Valve proportionnelle dessinée par CFL et contrôlée par ordinateur, système d'alimentation électrique.
Séchage de la colle	à l'air	Par presse à haute fréquence avec 3 tunnels (un de 17 pieds et deux de 24 pieds) 25 kw/tunnel	Tunnel haut fréquence de 50 pieds avec 2 générateurs RFS	Tunnel haut fréquence, 3 sections de 40 KW/section, de marque RFS	Four haut fréquence, trois tunnels, le premier est de marque SRT et les deux autres LNL
Température de la colle à l'intérieur du dépôt	22-23°C	-	T° ambiant 18°C à 27°C	T° à 20°C en chambre conditionnée	18-19°C
Pression d'application	100 psi	-	-	Contrôlée à l'air comprimé, varie entre 20 et 30 psi.	35-40psi (38 psi donne la quantité idéale)
Formulation de la colle	-	-	-	Mélangé sur la ligne à une ratio de colle versus catalyseur de 2,34:1	Mélangé sur la ligne. Colle versus catalyseur 2,1(à 2,33):1 (le ratio est mesuré et testé plusieurs fois par jour)
Viscosité	-	Ils ne sont pas équipés pour la mesurer. Il y a un refroidissement de la colle (entre 15 et 18°C). Ils contrôlent le temps de gel (qui doit être de 15 à 20 min)	Ils mesurent plutôt le rapport catalyseur-résine. Entre 2 à 2,6. Visent 2,3.	Mesure avec viscosimètre Cole-Parmer digital, 98936 Series	-
Grammage (colle par surface de joint)	-	-	Ajusté de façon empirique, pas calculé S'il y a trop de colle, on génère des arcs électriques qui sont souvent observés lors qu'on obtient des résultats de tests très bas	7 à 9 g/joint	Contrôlé par ordinateur, on vérifie l'excès de squeeze-out, le volume de colle influence la température dans le four
Temps gel	-	-	-	19 minutes ± 5	Test de gel 19 min (12 à 20)
Autres	-	-	-	-	Problèmes de constance dans la viscosité et la couleur varie également

Tableau A. 5. Assemblage et pressage des joints.

	Usine A	Usine B	Usine C	Usine D	Usine E
Configuration de la presse à haute fréquence (pour quelle vitesse, humidité et température).	Pas de presse RF, utilisation de colle isocyanate	-	Deux générateurs de 35 pieds et ils visent des températures de pressage entre 85°C et 95°C. La vitesse dans la presse est approximativement de 285 pieds/min, mais elle est variable. À humidité fixe, on peut augmenter l'ampérage pour augmenter la vitesse de passage. Si l'humidité augmente trop, il faut ajuster l'ampérage pour éviter les arcs. Au démarrage de la presse, il faut ajuster la température à l'aide de thermocouples. On part à relativement faible ampérage et vitesse. Aux paramètres de démarrage, on vérifie la température lorsqu'on obtient 70 à 75°C, on augmente graduellement l'ampérage jusqu'à atteinte 85°C. Par la suite, on peut continuer à augmenter l'ampérage pour augmenter la vitesse jusqu'à atteinte des paramètres de croisière	3 sections de 40KW par section fours de 20 pieds/section. Ajustement selon la T° de sortie (entre 80 et 90°C) et brûlures (arcs).	3 sections de 50KW, 75KW et 75 KW. Première presse SRT, 2 autres LNL. Longueur tunnel: 60 pieds (20 pieds chacun). Entrée Tunnel 1 à 70°F, sortie à 135 °F. Entrée Tunnel 2 à 135 °F, sortie à 150°F. Entrée Tunnel 3 à 150°F et sortie à 150-160 °F
Temps de presse	-	-	10 à 12 sec	2,5 secs dans les rouleaux presseurs (10 pieds), 250 pieds/min dans le tunnel de 60 pieds (15 sec)	60 pieds @ 350 pieds/min
Temps de durcissement (après pressage)	-	-	40 à 60 min avant test de tension en ligne	¾ heures (si 48 pieds de semelles) 60/48 X ¾ heures (si 60 pieds de semelles) 32/48 X ¾ heures (si 32 pieds de semelles)	10 à 20 minutes
Température à la sortie de la RF	-	-	-	-	140° à 150°F

Tableau A. 6. Essais de contrôle de la qualité des joints.

Usine A			
Types des essais	Flexion	Traction	Delamination
Normes		SP1-2000	
Temps d'application de la charge	30 secs selon la norme SP1-2000	30 secs selon la norme SP1-2000	-
Marque système d'essai	Systech TNS Industrie		-
Autres	-	-	-

Usine B			
Types des essais	Flexion	Traction	Delamination
Normes	SP1-2000	SPS4 MOE selon SPS2	SP1-2000
Temps d'application de la charge	-	-	-
Marque système d'essai	Metriguard Systech F312		
Autres	La résistance à la traction est le problème principal, il y a une tendance à avoir des performances marginales en traction, surtout quand on est dans le bois le plus fort (MSR 2100). Le bois est plus fort sur la rive qu'à plat (4 à 5% plus fort)		

Usine C			
Essais non destructifs: Profitel, test en ligne (crown machine). Entre quarante et soixante minutes entre le pressage et le test de résistance.			
Types des essais (destructifs)	Tension	flexion	
Normes	SPS-2	Essais sans joint pour tester la résistance du bois.	
Temps d'application de la charge	-	-	-
Marque système d'essai	-	-	-
Autres	-	-	-

Usine D			
Essais non destructifs: Profitel, test en ligne (crown machine). Entre quarante et soixante minutes entre le pressage et le test de résistance.			
Types des essais (destructifs)	Flexion	Tension	Delamination
Normes	SPS1 (3 ou 4 fois par mois)	SPS3 à chaque faction (10 à 15% de la prod.)	
Temps d'application de la charge	3 à 4 sec.		
Marque système d'essai	Crowne machine		
Autres	Ils travaillent aussi selon les spécifications des clients		

Usine E			
Essais non destructifs: Profitel, test en ligne (crown machine). Entre quarante et soixante minutes entre le pressage et le test de résistance			
Types des essais (destructifs)	En ligne: tension	Flexion	rupture
Normes	-	-	-
Temps d'application de la charge	-	-	-
Marque système d'essai	Crowne	Systech avec logiciel de Forintek	Systech avec logiciel de Forintek
Autres	Souvent 3,5 % de pertes à l'étireuse (essai en ligne Crowne) avec moyenne de 6% de pertes. Le temps requis entre le collage et l'essai de traction diminue si on du four à plus basse température. À l'étireuse, on met un jet d'encre au bout s'il y a une rupture dans les joints.		

Tableau A. 7. Autres aspects reliés au procédé d'aboutage du bois.

Usine A	Usine B	Usine C	Usine D	Usine E
Actuellement l'entreprise ne travaille pas avec Phénol Résorcinol, cependant, durant l'hiver, l'utilisation de cette colle a eu beaucoup des problèmes à cause de l'humidité et la température.	D'après eux, un autre aspect intéressante a étudier peut être la qualité des joints avec du bois provenant des arbres vivant et des arbres morts (brûlés ou seulement morts debout)	Le gros problématique a été toujours le séchage à haute température. Si le bois est trop séché, ils trouvent des problèmes de torsion et des dimensions.	-	Il y deux lignes d'aboutage: structurel et non-structurel. (Les produits fabriqués sont principalement du colombage, puis des classes mécaniques 2100 et 1650.)
Parfois arrivent des pièces d'une même espèce qui sont très légères. Ces types de pièces sont très difficiles à travailler	Le fil soulevé est un problème puisque empêche le collage des joints. L'influence des paramètres d'affûtage est autre aspect à surveiller.	Avoir l'humidité adéquate est un problème. Le facteur COFI pour calibrer des hygromètres est adapté pour le Douglas fir donc la mesure de l'humidité de l'épinette noire est prise avec cette échelle et toujours ils trouvent autour de 5% de plus dans les méditions d'humidité.	Il y a des problèmes avec la variabilité de la densité entre deux pièces à abouter parce qu'il y a des grands écarts entre eux.	Chaque 5 minutes ils mesurent la température de la colle des entures.
À la rainureuse ils ont eu des problèmes d'usure	Ils ont des problèmes de chauffage des couteaux c'est qu'implique des points croisés. Ils ont aussi des problèmes de glacage de surfaces et ceci n'aide pas au collage.	Ils changent le porte-outil chaque 12 heures mais pas le deux en même temps. Si le bois a trop d'arrachement ils vont changer le porte-outil.	Il n'y a pas de contrôle de l'humidité.	Le gap critique est 1/32"
Le problème le plus important d'après l'ingénieur est l'effet de la vitesse de coupe sur la qualité du collage. Ils travaillent sur un angle d'attaque plus grand que celui recommandé	Les types de joint essayés sont: Inversée et Sans épaulement. Le joint du type Sans épaulement est 2% plus résistant (MOR flexion à plat) que le joint inversée.	D'après l'ingénieur de l'usine, il est très intéressant d'étudier les caractéristiques d'usage d'aboutage du bois avec un adhésif du type isocyanate car le phénol-résorcinol n'a pas un bon futur entre les entreprises productrices du bois collé structurelles.	Le bois d'épinette noire a beaucoup de bois de compression, surtout dans le bois de tourbières coupées en hiver. Ça a un effet mais ça ne semble pas dramatique	-
Leur perception est que leur problème le plus important est l'usure des couteaux et la détermination du temps entre les changements de couteaux.	-	-	Trop de déviation du fil est aussi un problème car la machine de classement MSR par Rayon-X ne détecte pas ce type de défaut.	La variabilité de longueurs entre les pièces à abouter parce qu'il y a des grands écarts entre eux et ça cause beaucoup d'arrêts.
-	-	-	Présence de roulures, on les constate souvent seulement après les essais destructifs	Une possibilité de recherche dans le domaine d'aboutage c'est le rapport T% Humidité du bois.
-	-	-	Ils ont de problèmes de pénétration de la colle	-
-	-	-	Quand changer les porte-outils? C'est ça la question	-
-	-	-	L'affûtage et la qualité de l'affûtage est un problème	-
-	-	-	Il y a un problème de rendement qui est de l'ordre de 70 à 75% seulement.	Excès d'humidité, quand ça arrive, les valeurs de résistance en tension deviennent trop faibles
-	D'après eux, il est très important étudier l'angle d'attaque par rapport aux porte-outils.	-	-	L'affûtage des couteaux est un aspect primordial.

## ANNEXE B

### Effet de la pression sur la surface collée des joints. Une analyse microscopique

Cette annexe montre la méthode et les résultats de l'analyse microscopique effectués sur la surface transversale et longitudinale de la ligne de colle des joints. Les joints à entures multiples ont été soumis à différentes pressions d'assemblage qui vont de 1,38 MPa à 4,82 MPa. La procédure suivie lors de la fabrication de joints à entures multiples a celle décrite au Chapitre IV: *Effects of curing time and end-pressure on the tensile strength of finger-joined black spruce lumber*. Une pièce contenant au moins 5 joints à entures multiples a été fabriquée par chaque condition de pression d'assemblage. Les pièces assemblées ont été automatiquement coupées à 2,44 m et ont été entreposées durant vingt-quatre heures dans une chambre de conditionnement à 20°C et 65% HR. Ensuite, trois des cinq joints de la pièce ont été choisis au hasard afin d'obtenir des échantillons pour l'analyse microscopique. De 12 à 18 blocs de 1 cm<sup>2</sup> ont été coupés des joints afin d'obtenir les échantillons avec les lignes de colle sur la surface transversale des blocs (figure B.1). D'autre part, pour observer l'effet de la pression sur l'espace laissé au fond de l'enture (S), sept blocs de 1 cm<sup>2</sup> pour la pression la plus basse et sept blocs pour la pression la plus élevée, contenant la pointe des entures ont été également coupés des joints. De plus, trois blocs de 1 cm<sup>2</sup> furent obtenus pour les pressions intermédiaires. L'observation microscopique dans ce cas fut donc faite sur la face longitudinale des joints (figure B.1).

Les surfaces (transversale et longitudinale) des blocs ont été préparées avec une lame de rasoir afin d'obtenir une qualité adéquate de la surface. Les blocs ont été séchés avec du pentoxide de phosphore pour environ deux semaines, montés ensuite sur une plaque d'aluminium avec une peinture en argent, re-séchés et recouverts avec une couche d'or par un système de pulvérisation cathodique. Des micrographies électroniques de surfaces représentatives ont été prises pour chacune des six pressions appliquées. La profondeur de dommage de cellules et l'épaisseur de la ligne de colle ont été évalués dans cinq points, choisies systématiquement dans chaque micrographie électronique transversale. Le jeu en fond de l'enture (S) a été également mesuré dans chaque micrographie électronique longitudinale.

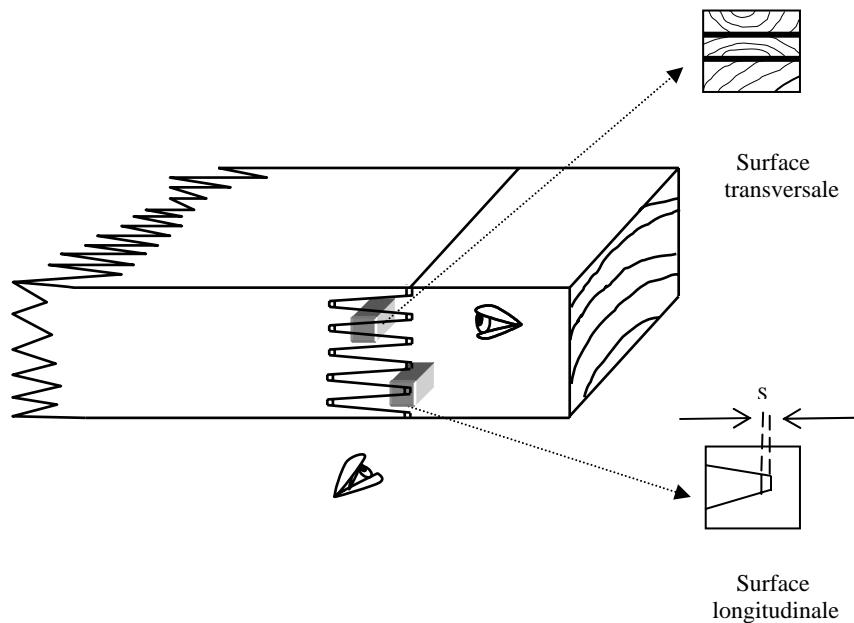


Figure B. 1. Schéma de coupe des blocs pour l'analyse microscopique

## Résultats

### *Analyse microscopique de la face transversale de la ligne de colle*

L'analyse microscopique des joints a indiqué qu'il y a de dommages de cellules dans les parties les plus proches de la ligne de colle. En général, la profondeur de cellules endommagées (D) était plus importante à mesure que la pression d'assemblage a augmentée de 1,3 MPa à 4,9 MPa (figure B.2 et figure B.3). Les trachéides près de la ligne de colle ont été comprimées notamment à des pressions d'assemblage élevées. Les rayons ont été aussi comprimés et déformés. On observa aussi que le dommage du bois final fut moins important que celui dans le bois initial, ce qui peut être expliqué par la masse volumique plus élevée du bois final par rapport à celle du bois initial. Les résultats montrent que la profondeur maximale de dommage de cellules (53 µm) a été

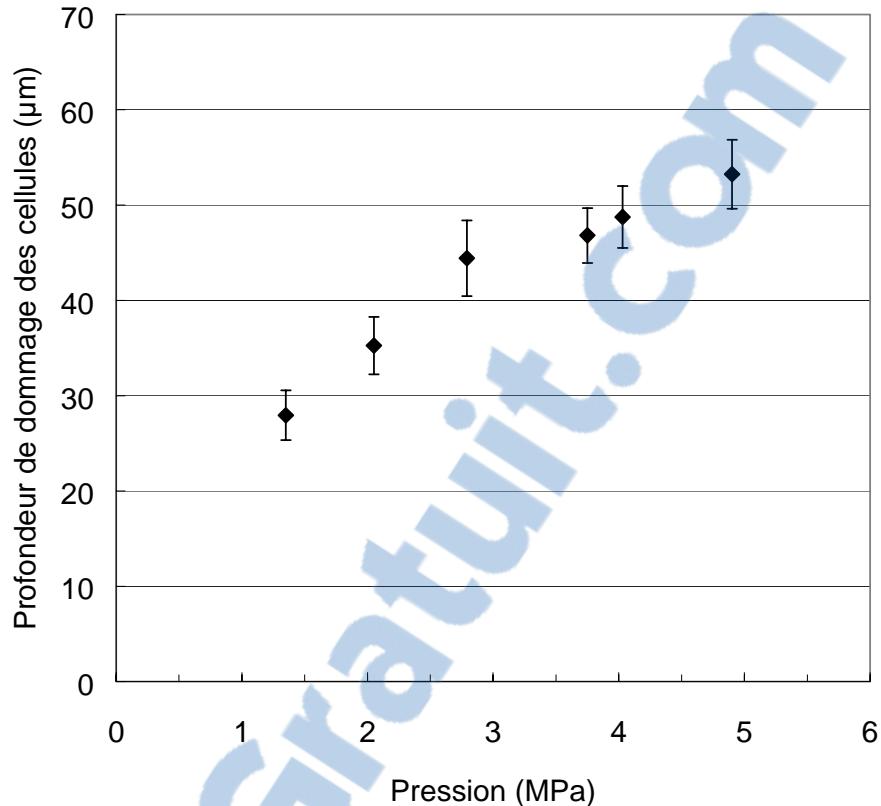
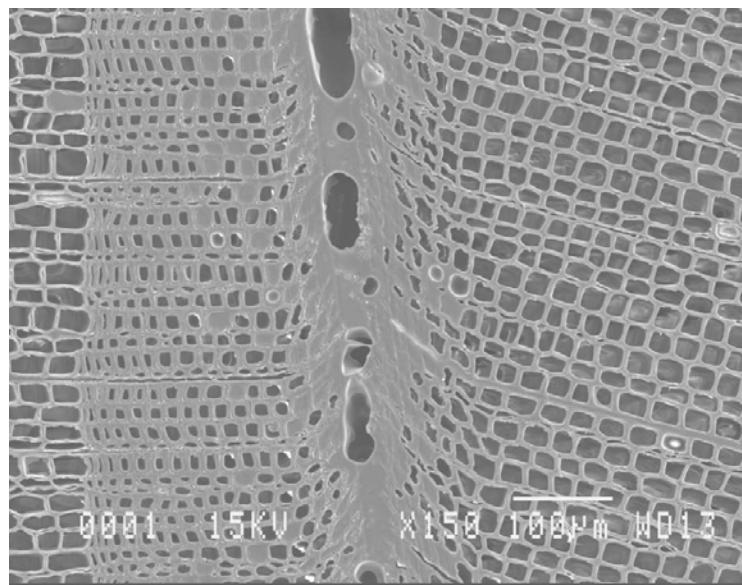
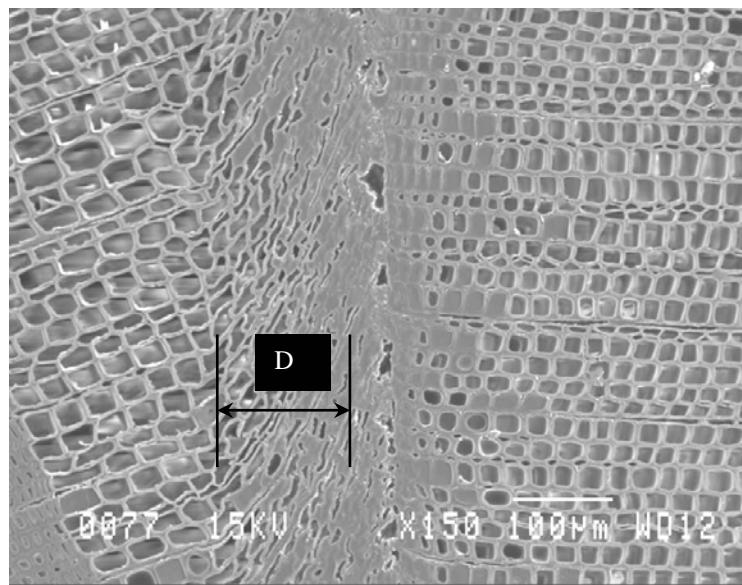


Figure B. 2. Épaisseur de la couche des cellules endommagés en fonction de la pression d'assemblage du bois d'épinette noire abouté

atteinte à 4,9 MPa de pression d'assemblage ce qui représente 90% de plus de profondeur de dommage obtenue à 1,3 MPa de pression d'assemblage (28 μm). Par ailleurs, à basse pression d'assemblage (1,3 MPa) des bulles d'air à l'intérieur de la ligne de colle ont été notées, ce qui peut expliquer aussi la moindre performance mécanique de ces joints. Pellicane *et al.* (1994) ont observé cet effet sur la résistance mécanique en traction des joints à entures multiples, ce qui s'est manifesté par une forte diminution de la résistance à la rupture en traction longitudinale. Une rupture dans des joints collés peut s'amorcer par une discontinuité géométrique du matériau à coller, ce qui provoque des concentrations de contraintes. Une bulle d'air dans la couche de l'adhésif est seul un exemple de discontinuité géométrique parmi plusieurs autres (River 1994).



A)



B)

Figure B. 3. Microographies électroniques (SEM) de la profondeur de dommage de cellules du bois d'épinette noire abouté aux pressions de A) 1,3 MPa et B) 4,9 MPa.

### ***Analyse microscopique de la face longitudinale de la ligne de colle des entures du bois abouté d'épinette noire***

L'analyse microscopique effectuée sur la surface longitudinale a montré l'effet de la pression sur le jeu au fond des entures (S). Cette analyse a permis de quantifier la variation de cette distance en fonction de l'application de différentes pressions. Les résultats sont montrés au tableau B1 et aux figures B4 et B5. Les distances entre l'extrémité d'une enture quelconque et la base de la rainure correspondante n'ont pas dépassé la valeur maximale exigée par la norme SPS 1-2000 qui est de 1,6 mm (1600 µm). Les résultats confirment également que la distance entre une enture et la racine de l'autre enture diminue à mesure que la pression augmente. Ce comportement se manifeste de façon plus importante pour les pressions plus basses de 1,3 MPa à 3,7 MPa. L'effet diminue ensuite légèrement à des pressions plus élevées jusqu'à atteindre un jeu au fond des entures de 53 µm pour une pression de 4,9 MPa. Ceci peut être expliqué en termes d'une plus grande incompressibilité de l'adhésif à des espaces plus réduits. La formation de bulles d'air s'est manifestée clairement pour les basses pressions étant donné l'espace existant en trop. L'apparition de gerces aux extrémités des entures a été caractéristique d'une pression très élevée (Figure B.5.F).

Tableau B. 1. Effet de la pression d'assemblage sur le jeu du fond des entures du bois abouté d'épinette noire.

	Pression d'assemblage (MPa)					
	1,3	2,2	2,8	3,7	4,0	4,9
Moyenne ( $\mu\text{m}$ )	687	354	212	116	75	53
Écart-type ( $\mu\text{m}$ )	79	45	88	13	10	12
n	7	3	3	3	3	7

n: Nombre d'échantillons

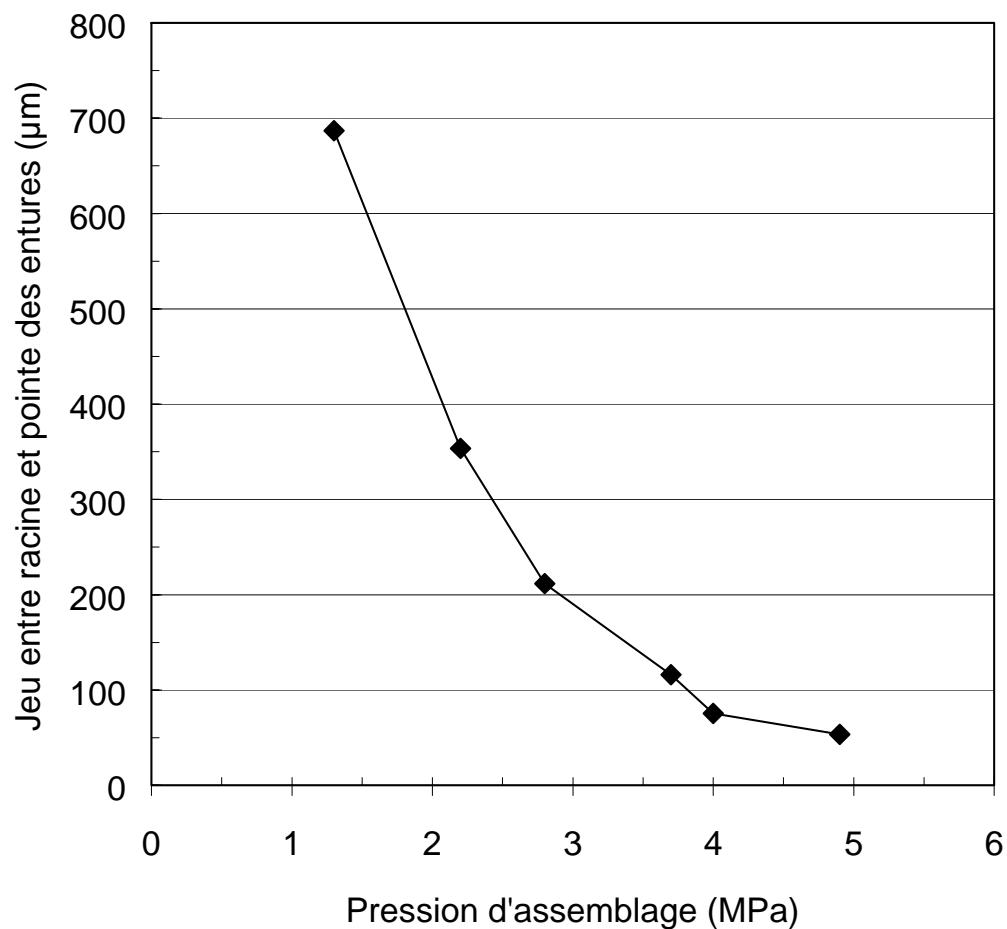


Figure B. 4 . Jeu du fond des entures du bois d'épinette noire, en fonction de la pression d'assemblage

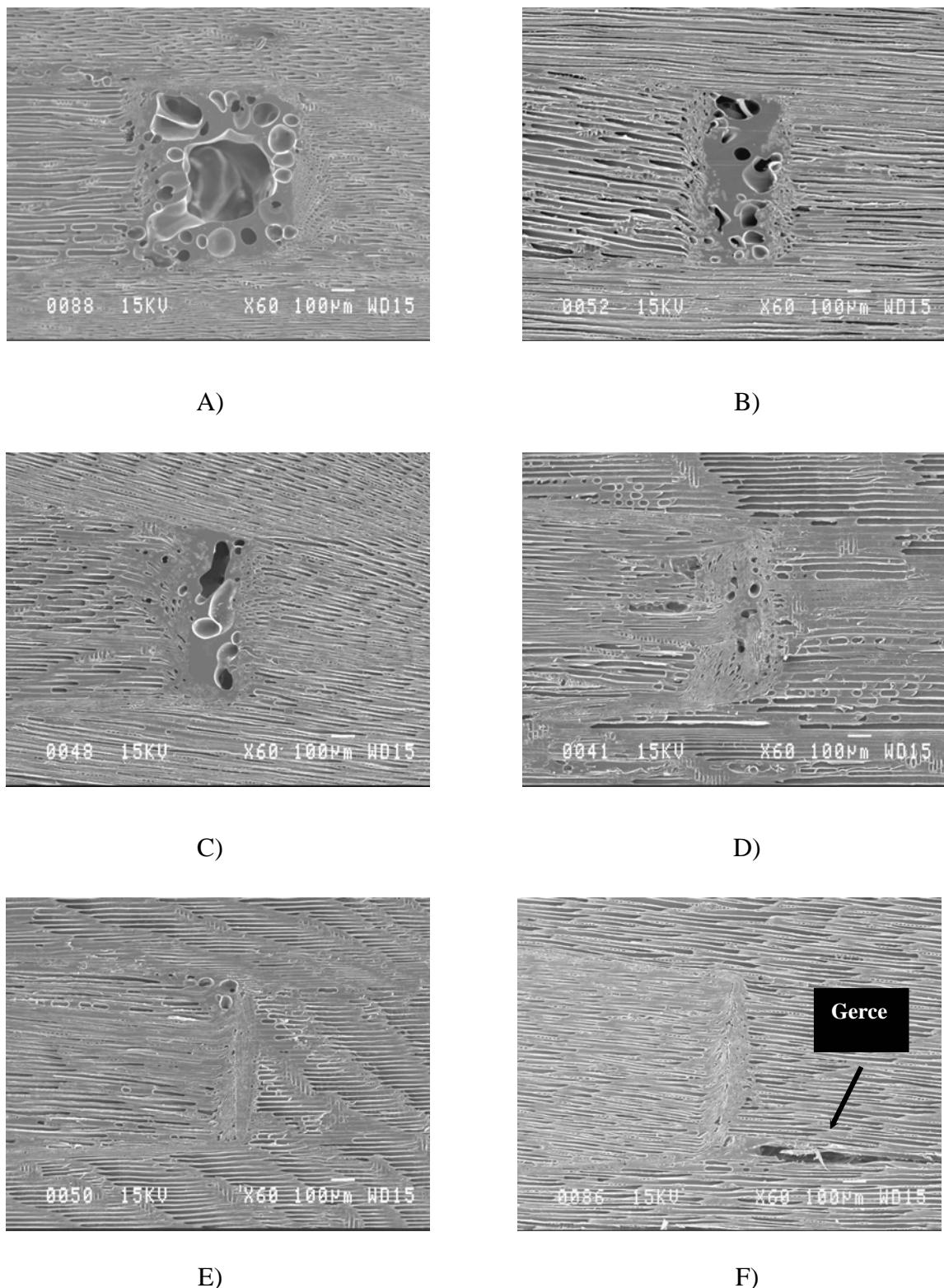


Figure B. 5. Jeu du fond d'enture aux pressions de A) 1,3 MPa, B) 2,2 MPa, C) 2,8 MPa, D) 3,7 MPa, E) 4,0 MPa et F) 4,9 MPa.